

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Уфимский государственный нефтяной технический университет»

На правах рукописи



ХАЗИЕВА Регина Тагировна

**СИСТЕМЫ СТАБИЛИЗАЦИИ ТОКА НА ОСНОВЕ
ИНДУКТИВНО-ЕМКОСТНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ**

Специальность:

05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:

кандидат технических наук, доцент

Конесев Сергей Геннадьевич

Уфа – 2018

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
Глава 1 Аналитический обзор существующих способов и устройств стабилизации тока.....	10
1.1 Обзор и сравнительный анализ индуктивно-емкостных преобразователей.....	10
1.2 Исследования динамики патентования систем стабилизации тока на основе индуктивно-емкостных преобразователей	22
1.3 Основные параметры и характеристики индуктивно-емкостных преобразователей.....	26
1.4 Методы исследования индуктивно-емкостных преобразователей на основе гибридных электромагнитных элементов	31
Выводы по главе 1 и постановка задач исследования.....	37
Глава 2 Разработка технических решений индуктивно-емкостных преобразователей для систем стабилизации тока.....	38
2.1 Определение требований к индуктивно-емкостным преобразователям для создания систем стабилизации тока на их базе.....	38
2.2 Анализ базовых структур и выбор многофункционального интегрированного электромагнитного компонента.....	39
2.3 Разработанные технические решения индуктивно-емкостных преобразователей для систем стабилизации тока.....	43
2.4 Технические решения электротехнических систем и устройств на основе индуктивно-емкостных преобразователей.....	48
Выводы по главе 2.....	52
Глава 3 Моделирование индуктивно-емкостных преобразователей и систем стабилизации тока на их базе.....	54
3.1 Разработка математических моделей и исследование частотных и энергетических характеристик индуктивно-емкостных преобразователей.....	54
3.2 Оценка стабилизационных свойств разработанных индуктивно-	

емкостных преобразователей.....	71
3.3 Исследование режимов работы многофункциональных интегрированных электромагнитных компонентов в электротехнических системах и устройствах.....	85
3.4 Оценка надежности многофункциональных интегрированных электромагнитных компонентов	113
Выводы по главе 3.....	125
Глава 4 Экспериментальные исследования и практическая реализация разработанных устройств.....	128
4.1 Разработка методики и алгоритма расчета параметров индуктивно-емкостных преобразователей, работающих в составе мостовых инверторов...	128
4.2 Экспериментальные исследования индуктивно-емкостных преобразователей и подтверждение адекватности моделей.....	133
4.3 Практическая реализация и внедрение разработанных устройств....	155
Выводы по главе 4	156
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	157
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	160
ПРИЛОЖЕНИЕ А Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.....	180
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Схемы индуктивно-емкостных преобразователей с подключенной нагрузкой.....	183
ПРИЛОЖЕНИЕ В Справки о внедрении	188

ВВЕДЕНИЕ

Множество электротехнических систем и устройств требуют обеспечения питания неизменным током при изменении в широких пределах сопротивления, подключенных к ним нагрузок [1]. Обеспечить постоянство тока при изменении сопротивления нагрузки и повысить КПД источников электропитания мощных нагрузок позволяют системы стабилизации тока (ССТ) с индуктивно-емкостными преобразователями (ИЕП) [2]. При малых сопротивлениях нагрузки ИЕП токи, протекающие через элементы инвертора, значительно возрастают, что не позволяет использовать Т-образные и мостовые схемы ИЕП с взаимоиנדуктивными связями, имеющие более высокие энергетические показатели по сравнению со схемами Бушера [3]. Оптимальным с точки зрения коэффициента мощности и КПД является выполнение ИЕП симметричным [4]. Энергетически эффективными являются инверторы напряжения, выполненные по мостовой схеме, построенные на базе ИЕП, выполненного по Г-образной схеме Бушера с предвключенной индуктивностью [5].

Однако, ИЕП на дискретных электромагнитных элементах (ЭМЭ) присущ ряд недостатков. К основным из них относятся большие масса и габариты при работе от промышленной сети, аварийность холостого хода, стабилизация тока нагрузки небольшой амплитуды в узком диапазоне изменения сопротивления нагрузки [6]. Выбор данной темы для исследования обоснован необходимостью устранения указанных недостатков.

Одним из технических средств улучшения стабилизационных свойств, массогабаритных показателей и показателей надежности ИЕП является функциональная интеграция ЭМЭ. Уменьшить установленную мощность элементов ИЕП, снизить массу и габариты, улучшить стабилизирующие свойства ССТ позволяет использование в качестве ИЕП гибридного ЭМЭ. В связи с тем, что ИЕП состоит из ЭМЭ с частотнозависимыми параметрами и работает эффективно только на резонансной частоте, актуальной задачей является исследование характеристик ИЕП при вариации частоты. Стабильность тока

нагрузки ИЕП при отклонении частоты питающей сети зависит от вариантов соединения реактивных элементов, образующих структуру ИЕП, и схемы подключения источника питания. Научный и практический интерес представляет изучение частотных характеристик гибридного ЭМЭ для определения оптимального диапазона изменения сопротивления нагрузки, при котором КПД будет максимальным, исследование стабилизационных свойств и режимов работы ИЕП на их основе при применении в ССТ. Таким образом, исследование и разработка ИЕП на основе гибридного ЭМЭ с улучшенными стабилизирующими свойствами по току нагрузки и массогабаритными показателями является актуальной научной задачей.

Степень разработанности темы исследования. Традиционно ССТ на основе ИЕП применяются в импульсной и преобразовательной технике в зарядных устройствах накопительных конденсаторов, батарей аккумуляторов, в электроприводе, автономных системах электроснабжения, электротермии, лазерной технике и светотехнике, в системах зажигания. Индуктивно-емкостные преобразователи на дискретных ЭМЭ разрабатываются и исследуются учеными В. М. Опре, П. А. Кошелевым, С. В. Парамоновым, В. С. Хиловым, А.В. Осиповым, В.Д. Семеновым, А. О. Сулаймановым, С. А. Дозоровым, В.И. Самулеевым [6]. Улучшение стабилизационных свойств, массогабаритных показателей и показателей надежности ИЕП методами функциональной интеграции исследуется в работах ученых и специалистов, среди которых Г. П. Задерей, П. Н. Заика, С. И. Закревский, В. М. Вакуленко, И. В. Пентегов. Задачи проектирования и расчета ИЕП на гибридных ЭМЭ решались в работах, проведенных А. Н. Волковым, И. В. Пентеговым, Л. Р. Слободяном. Вопросы исследования и математического моделирования индуктона в своих трудах отразили как отечественные, так и зарубежные ученые: А. Н. Милях, И. В. Волков, С. И. Закревский, В. В. Пшеничный, Б. Е. Кубышин. Кашиным Ю. А. запатентована конструкция декона. Бердников С. В. рассматривал схемы узлов принудительной коммутации тиристоров с обмоткой-емкостью. В работах Бутырина П.А., Гусева Г.Г., Шакирзянова Ф.Н. исследуется

использование катушек-конденсаторов («катконов») в фильтрокомпенсирующих устройствах для снижения массы и габаритов. Созданием и исследованием электротехнических устройств на основе гибридных ЭМЭ (спиральной полосковой линии, спиральной передающей линии) занимались В. И. Мельников, С. Г. Конесев, И. Г. Михайлов. В работах С. Г. Конесева разработаны и исследованы базовые структуры **многофункционального интегрированного электромагнитного компонента (МИЭК)**, на основе которого могут быть выполнены все перечисленные выше гибридные ЭМЭ [7, 8, 9].

Однако в отличие от ранее изученных и подробно исследованных ИЕП, выполненных на дискретных ЭМЭ, разработка и создание ИЕП на основе МИЭК вызывает множество вопросов. Недостаточно исследованы возможности создания ИЕП на основе различных структур МИЭК и режимы их работы, в том числе для ряда структур МИЭК не разработаны методики расчета параметров. Таким образом, исследование режимов работы ССТ с ИЕП на базе МИЭК является актуальной научной задачей.

На основании изложенного **целью** диссертационной работы является повышение эффективности систем стабилизации тока на основе индуктивно-емкостных преобразователей методами функциональной интеграции электромагнитных элементов.

Определены и решены **задачи**:

- аналитический обзор и патентные исследования методов и систем стабилизации тока на основе ИЕП;
- разработка новых технических решений ИЕП, стабилизирующих ток нагрузки в широком диапазоне изменения сопротивления нагрузки, при повышении надежности и улучшении массогабаритных показателей;
- исследование на основе созданных математических и компьютерных моделей режимов работы и характеристик разработанных ИЕП;
- разработка методики расчета электрических параметров гибридного ЭМЭ, выполняющего функцию ИЕП;

- экспериментальные исследования для подтверждения достоверности полученных результатов и адекватности созданных математических и компьютерных моделей.

Научные положения и результаты, выносимые на защиту:

- новые схемные решения ИЕП повышенной надежности с улучшенными массогабаритными показателями, которые обеспечивают стабилизацию тока нагрузки в широком диапазоне изменения сопротивления нагрузки;

- математические и компьютерные модели ИЕП, новизна которых заключается в использовании уточненной схемы замещения, учитывающей активное сопротивление и магнитную связь проводящих обкладок МИЭК;

- результаты теоретического и экспериментального исследования на основе разработанных математических и компьютерных моделей и макетных образцов МИЭК стабилизационных свойств и особенностей функционирования ИЕП в составе систем стабилизации тока.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- разработаны новые технические решения ИЕП повышенной надежности с улучшенными массогабаритными характеристиками, которые обеспечивают стабилизацию тока в широком диапазоне изменения сопротивления нагрузки;

- показана возможность создания на основе выбранной структуры МИЭК тридцати двух комбинаций схем ИЕП для ССТ и доказана эффективность использования МИЭК одновременно в качестве стабилизатора тока, коммутационного контура инвертора и усилителя напряжения;

- установлены диапазоны изменения сопротивления нагрузки и частоты собственных колебаний контура ИЕП, в которых соблюдаются необходимые условия работы ССТ для различных схмотехнических исполнений ИЕП и осуществляется стабилизация тока нагрузки с требуемой точностью;

- выявлена схема ИЕП на основе МИЭК с наилучшими стабилизирующими свойствами по току нагрузки и определено схмотехническое исполнение ИЕП с наибольшим коэффициентом усиления по напряжению, стабилизирующее ток нагрузки большей амплитуды.

Практическая значимость работы заключается в следующем:

- новые схемные решения ИЕП и ССТ на их базе повышенной надежности с улучшенными массогабаритными показателями обеспечивают стабилизацию тока нагрузки в широком диапазоне изменения сопротивления нагрузки (патенты РФ на изобретения и полезную модель № 2450413, № 2632412, № 2584137, № 117748);

- созданные математические и компьютерные модели позволяют определить энергетически эффективные режимы работы ССТ с ИЕП при различных способах соединения секций МИЭК (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017611392 от 02.02.2017);

- разработанный алгоритм и предложенная методика расчета ИЕП позволяют определить параметры МИЭК, при которых обеспечиваются улучшенные стабилизационные свойства и массогабаритные показатели ИЕП и ССТ в целом в широком диапазоне изменения сопротивления нагрузки (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017619387 от 24.08.2017);

- табличные данные показателей надежности МИЭК могут использоваться при проектировании электротехнических систем и устройств (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017614066 от 06.04.2017).

Практическая ценность результатов работы подтверждается справкой о результатах внедрения запатентованных решений устройств на предприятии ООО НИЦ «Энергодиагностика», справкой о результатах внедрения научных исследований в области оценки надежности ЭМЭ на предприятии ЗАО «Уфа-АвиаГаз», а также в учебном процессе кафедры электротехники и электрооборудования предприятий УГНТУ.

Исследования ИЕП для ССТ выполнены при поддержке УГНТУ в рамках грантов для аспирантов с 2014 по 2017 гг., а также корпоративного гранта ПАО АНК «Башнефть» в 2017 г.

Апробация работы. Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на Международных научно-технических конференциях (НТК), в том числе: I, II и III НТК «Электропривод, электротехнологии и электрооборудование предприятий» (УГНТУ, г. Уфа, 2013, 2015, 2017), VII НПК «Научное творчество XXI века» (г. Красноярск, 2013), 69-й, 70-й и 71-й молодежных НК «Нефть и газ» (РГУ нефти и газа им. Губкина, г. Москва, 2015 – 2017), VIII и X НПК «Актуальные проблемы науки и техники» (УГНТУ, г. Уфа, 2015, 2017), XVII и XVIII молодежных НК «Севергеозкотех» (УГТУ, г. Ухта, 2016, 2017), X и XI IEEE НТК «Динамика систем, механизмов и машин» (ОмГТУ, г. Омск, 2016, 2017), XI НТК «Завалишинские чтения» (СПб. ГУАП, г. Санкт-Петербург, 2017), НТК «Наука. Технология. Производство» (филиал УГНТУ в г. Салавате, 2017), III НТК «Пром-Инжиниринг» (СПб. ГУАП, г. Санкт-Петербург, 2017), НПК «Актуальные вопросы энергетики» (ОмГТУ, г. Омск, 2017), молодежной НК «XIV Королёвские чтения» (Самарский университет им. акад. С.П. Королёва, г. Самара, 2017), II НТК «Энергетические системы» (БГТУ им. В.Г. Шухова, г. Белгород, 2017), НПК «Энергия молодежи для нефтегазовой индустрии» (АГНИ, г. Альметьевск, 2017), IV НПК «Прикладная математика и информатика: современные исследования в области естественных и технических наук» (ТолГУ, г. Тольятти, 2018).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 22 научных труда, в том числе 18 статей, из них 4 статьи, опубликованные в изданиях, индексируемых базами *Web of Science* и *Scopus*, 8, входящих в перечень ВАК, 4 патента РФ на изобретения и полезные модели. Получены 3 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ (приложение А). Перечень публикаций автора приведен в диссертации в полном объеме.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав основного текста объемом 148 страниц, заключения, списка литературы из 144 наименований, трех приложений. Общий объем диссертации 190 страниц, включая 119 рисунков и 10 таблиц.

ГЛАВА 1 АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ СПОСОБОВ И УСТРОЙСТВ СТАБИЛИЗАЦИИ ТОКА

1.1 Обзор и сравнительный анализ систем стабилизации тока

Системы стабилизации тока (ССТ) используются в различных областях электротехники, импульсной электроэнергетики, электротермии, электропривода, преобразовательной техники (рисунок 1.1) [10, 11].



Рисунок 1.1 – Области применения ССТ

Для функционирования ССТ при изменении величины сопротивления нагрузки оптимальными являются схемотехнические решения, содержащие параметрические стабилизаторы тока, в качестве которых, чаще всего, используются индуктивно-емкостные преобразователи (ИЕП) (рисунок 1.2). Применением ИЕП обеспечивается повышение энергетической эффективности и надежности ССТ [12].



Рисунок 1.2 – Основные способы и устройства стабилизации тока

Преимуществами ИЕП, обеспечивающими их активное применение при создании ССТ, являются устойчивость к коротким замыканиям в цепи нагрузки, широкий диапазон регулирования рабочих токов, напряжений и частот, работа в режиме как прямого, так и обратного преобразования.

Кроме того, ИЕП широко применяются в качестве источников питания в электротехнических комплексах: в мощной импульсной технике для заряда накопительных конденсаторов, в лазерных установках, импульсных газоразрядных источниках света, электроприводе для питания двигателей постоянного тока [13, 14].

1.1.1 Обзор основных схемотехнических решений дискретных ИЕП

Существуют различные схемы ИЕП на дискретных ЭМЭ: Г-, Т-образные и мостовые структуры, отличающиеся числом и порядком включения элементов, наличием магнитной связи между катушками индуктивности (рисунок 1.3). К преимуществам Г-образной схемы ИЕП (рисунок 1.3, а) относятся простота, малый уровень нелинейных искажений, передаваемых в сеть, относительно малая масса, к недостаткам – более низкие КПД и коэффициент мощности [4]. Т-образные схемы Бушера (рисунок 1.3, б, в) и мостовая схема Штейнметца (рисунок 1.3, г) характеризуются более высокими КПД и коэффициентом мощности, но имеют большую массы и габариты и оказывают отрицательное влияние на качество напряжения сети [15].

Основные параметры ИЕП, в том числе точность стабилизации тока нагрузки и массогабаритные показатели, становятся лучше в случае выполнения ИЕП симметричными и использования магнитной связи между катушками индуктивности. В Т-образной схеме Бушера используется линейная магнитная связь между идентичными катушками индуктивности, размещенными на общем магнитопроводе (рисунок 1.3, б) [6]. Симметричная Т-образная схема Бушера с магнитной связью между катушками индуктивности является более совершенной, обладает улучшенными стабилизационными свойствами и энергетическими показателями, меньшими массой и габаритами (рисунок 1.3, в).

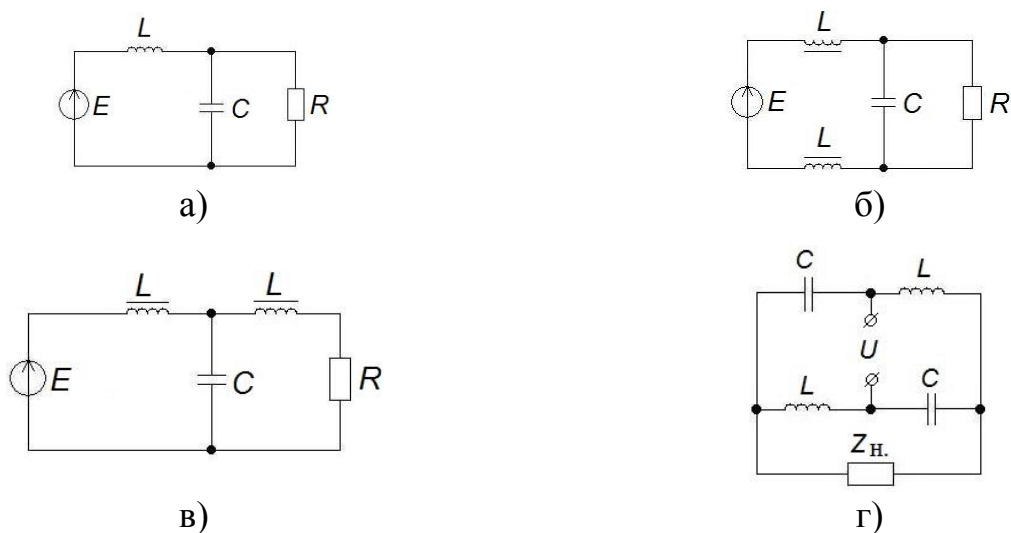


Рисунок 1.3 – Схемы, содержащие ИЕП на дискретных ЭМЭ:

а – Г-образная схема Бушера; б – Т-образная схема Бушера;
 в – симметричная Т-образная схема Бушера; г – мостовая схема Штейнметца

Описанные ИЕП, выполненные по схемам Бушера и Штейнметца, получили широкое распространение в зарядных устройствах емкостных накопителей (ЕН) от источника переменного тока благодаря высоким энергетическим показателям и простоте и надежностью схемы [16, 17, 18].

В [19] описано устройство заряда ЕН с ИЕП, повышающим трансформатором и трехфазной мостовой схемой выпрямления для заряда ЕН (рисунок 1.4). Применение ИЕП обеспечивает неизменность формы тока нагрузки, что обеспечивает линейный рост напряжения на заряжаемом ЕН, предотвращает броски тока при включении ЕН на заряд, позволяет своевременно отключить ЕН при достижении заданного уровня напряжения [20].

В [3] приведена упрощенная принципиальная схема источника питания, состоящего из статического транзисторного инвертора напряжения, ИЕП с повышающим трансформатором и выпрямителем. По условиям совместной работы инвертора с ИЕП применена Г-образная схема ИЕП, емкость C которого подключена к вторичной обмотке трансформатора T или ее части (рисунок 1.5). Целесообразность такого включения обусловлена возможностью выбрать емкость на номинальное рабочее напряжение и использовать индуктивность рассеяния L и межвитковую емкость трансформатора как элементы ИЕП.

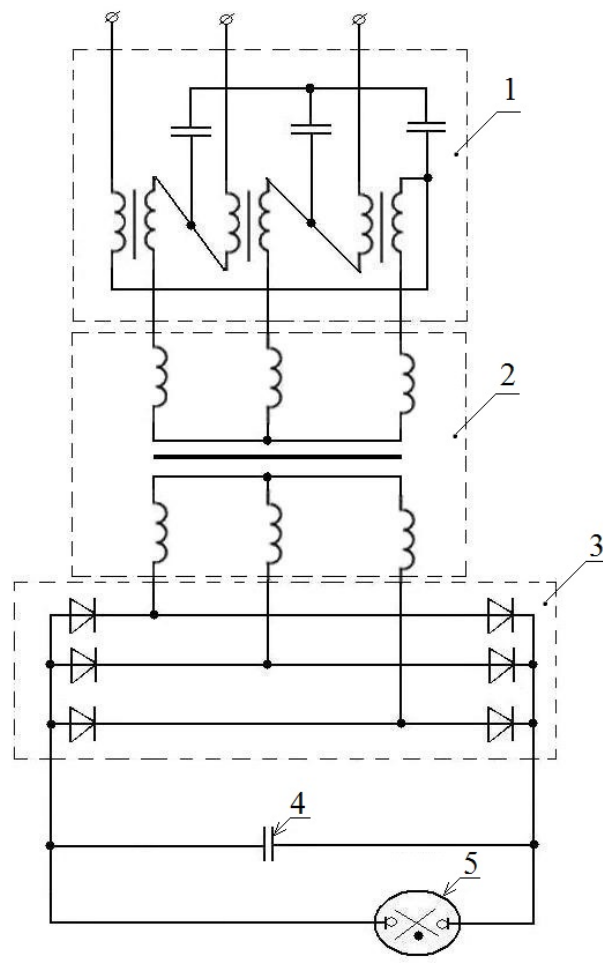


Рисунок 1.4 – Схема заряда ЕН:

1 – ИЕП; 2 – трансформатор; 3 – выпрямитель; 4 – ЕН; 5 – импульсная лампа

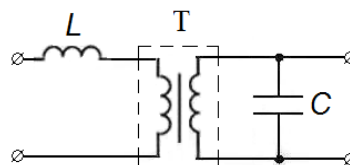


Рисунок 1.5 – Схема ИЕП

Кроме того, в [15] приведена схема трехфазного Т-образного ИЕП с междуфазными связями (рисунок 1.6). Обмотки каждого из трех дросселей включены в различные фазы нагрузки и источника питания, например, обмотки L_1 и L_2 общего магнитопровода включены соответственно в фазу А сети и в фазу В нагрузки. При этом оказывается, что векторы токов обеих обмоток каждого дросселя сдвинуты друг относительно друга на 210 электрических градусов, на существенно больший угол, чем в обычной Т-образной схеме. Такое видоизменение схемы привело к улучшению ее основных показателей.

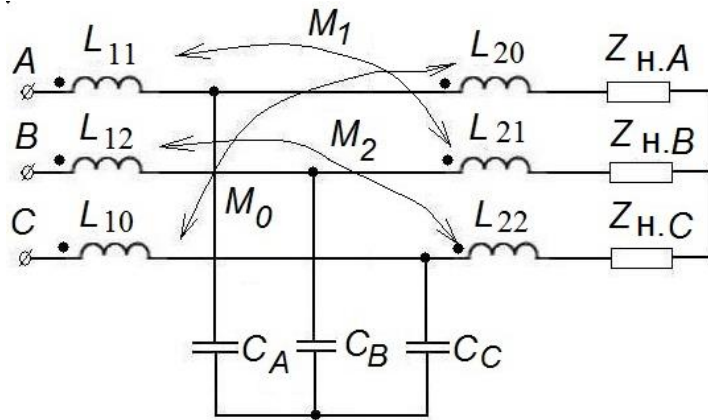


Рисунок 1.6 – Схема трехфазного Т-образного ИЕП с междофазными связями

В [15] также описана схема мостового преобразователя (рисунок 1.7). От схемы Штейнметца она отличается наличием дополнительных дросселей L_2 , магнитно связанных с основным дросселем L_1 , за счет чего данная схема обладает в 1,5 раза большей выходной мощностью.

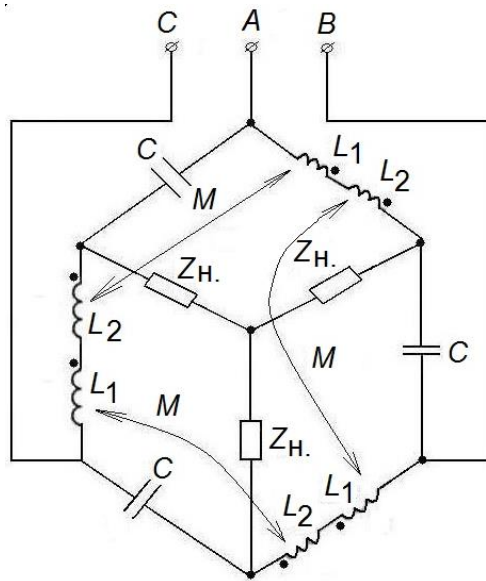


Рисунок 1.7 – Схема мостового преобразователя

В [4, 5] описаны схемы импульсных источников вторичного электропитания с ИЕП (рисунки 1.8 и 1.9). Достоинствами схемы ИЕП, представленной на рисунке 1.8, являются высокая надежность и простота конструкции, обусловленные схемой ШИМ-модулятора на базе *IGBT*-транзисторов [4]. К недостаткам данной схемы относятся низкий коэффициент мощности, большая масса и крупные габариты при работе на промышленной частоте, высокая чувствительность к нестабильности частоты сети [5].

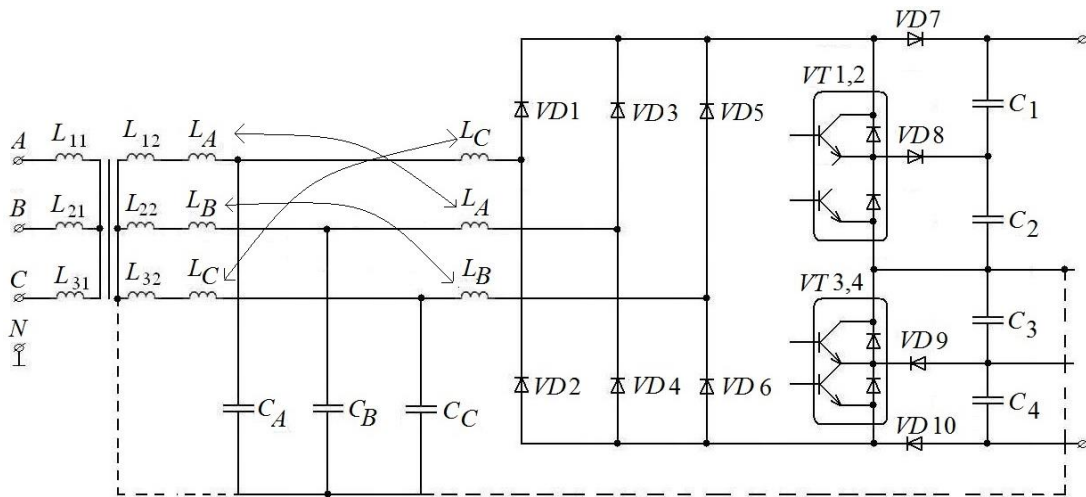


Рисунок 1.8 – Зарядный трансформаторно-выпрямительный ИЕП
с высоковольтным шунтирующим модулятором

Достоинствами схемы источника питания, показанной на рисунке 1.9, являются высокий КПД, надежность и простота из-за отсутствия промежуточного демпфирующего накопителя, сглаживание низкочастотных возмущений в сети за счет перераспределения мощности между активной и реактивной составляющими, недостатками – низкие энергетические показатели и искажения потребляемой активной мощности [4, 5].

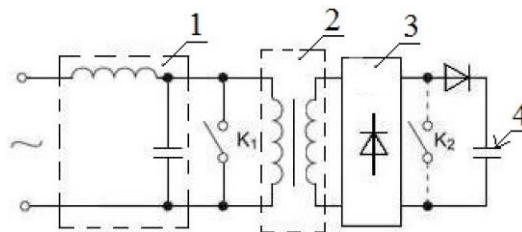


Рисунок 1.9 – Схема вторичный источник импульсного питания с ИЕП:

1 – ИЕП; 2 – трансформатор; 3 – выпрямитель; 4 – ЕН

Наиболее простыми схемами ИЕП на дискретных элементах являются схемы Бушера и Штейнметца: Г-образные, Т-образные, мостовые [10]. В [21] рассмотрены и рассчитаны Г-образные схемы ИЕП LC - и CL -видов (рисунок 1.10). В результате расчета отмечается, что значения установленных мощностей реактивных элементов в зависимости от подключения фаз источника питания различные. Следует учитывать этот факт для более точного расчета и проектирования ИЕП.

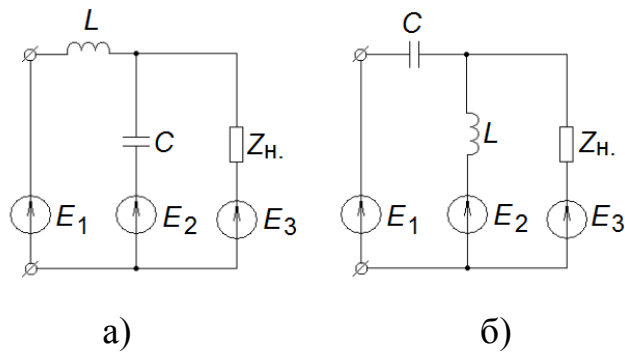


Рисунок 1.10 – Г-образные схемы ИЕП LC -вида (а) и CL -вида (б)

В [22, 23] проведен анализ работы Т-образных ИЕП, выполненных на основе одной обобщенной CLL -структуры, представленной на рисунке 1.11. Установлено, что условие стабилизации тока в нагрузке не зависит от напряжения питания, включенных внутри схемы, а определяется параметрами реактивных элементов [22].

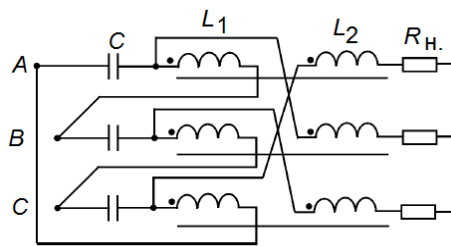


Рисунок 1.11 – Обобщенная структура Т-образных схем ИЕП

При питании источника вторичного электропитания от первичного источника переменного напряжения стабильной частоты рациональной структурой построения является схема, представленная на рисунке 1.12 [23].

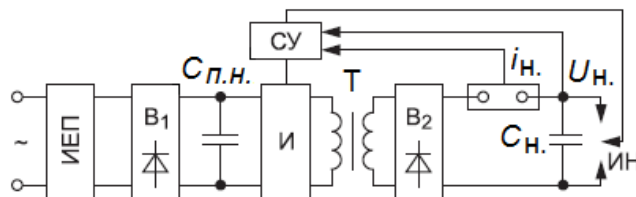


Рисунок 1.12 – Схема построения импульсного источника
вторичного электропитания:

ИЕП – индуктивно-емкостной преобразователь; В – выпрямитель;
 $C_{п.н.}$ – промежуточный накопитель; И – инвертор; Т – повышающий
 трансформатор; B_2 – высоковольтный выпрямитель;
 C_H – накопительный конденсатор

В [23] также исследован процесс заряда накопительного конденсатора от Т-образного ИЕП, выполненного по схеме Бушера (рисунок 1.13).

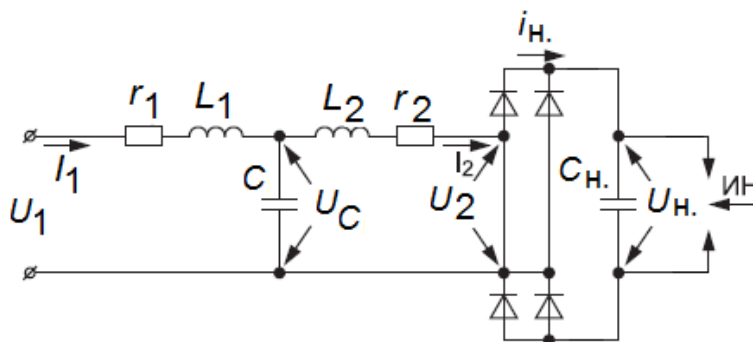


Рисунок 1.13 – Схема однофазного ИЕП по Т-образной схеме Бушера

Каждая категория схем ИЕП предназначена для выполнения определенных функций. К достоинствам Г-образной схемы относятся незначительная масса и влияние на источник питания, простая конструкция, хорошая электромагнитная совместимость, к недостаткам – низкие энергетические показатели; является единственной из однофазных схем ИЕП пригодной для работы от инверторов с несинусоидальной формой выходного напряжения. С точки зрения энергетической эффективности более оптимальными являются Т-образная и мостовая схемы, имеющие, однако, крупную массу и характеризующиеся низким качеством электрической энергии [3, 10].

Однако поскольку простые по конструкции ИЕП, выполненные на дискретных компонентах по схемам Бушера и Штейнметца, работают на промышленной частоте, то имеют недостатки: большую массу и крупные габариты, сложность плавного регулирования тока в широких пределах, низкую надежность из-за большого числа элементов, низкие энергетические показатели [24]. Кроме того, из-за влияния значения сопротивления нагрузки на резонансный LC-контур, при построении ИЕП на дискретных ЭМЭ необходимо изменять схему и параметры ЭМЭ ИЕП, подбирая их под каждую конкретную нагрузку.

Выбор данной темы для исследования обоснован необходимостью решения перечисленных выше задач. Данные недостатки устраняются при переходе на работу от источника напряжения повышенной частоты преобразования (таким источником может быть инвертор напряжения), а также использованием методов

функциональной интеграции ЭМЭ, а именно применением гибридных ЭМЭ, выполняющих функцию ИЕП [9, 17, 23]. Рациональным с точки зрения снижения массы и габаритов, повышения надежности, улучшения энергетических и стабилизационных показателей ИЕП представляется использование для их создания МИЭК [7, 8].

Для улучшения стабилизирующих, энергетических и частотных характеристик, снижения массы и габаритов ИЕП, входящих в состав источников вторичного электропитания, выполняют также введение магнитной связи между катушками индуктивности ИЕП (в случае дискретного исполнения) и проводящими обкладками МИЭК (в случае гибридного исполнения) [13].

1.1.2 Обзор и сравнительный анализ ИЕП на основе гибридных ЭМЭ

Существует множество гибридных ЭМЭ (рисунок 1.14), по принципу построения и действия их можно разделить на multifunctional электромагнитные трансформаторы (МЭТ) и интегральные LC-компоненты [25].

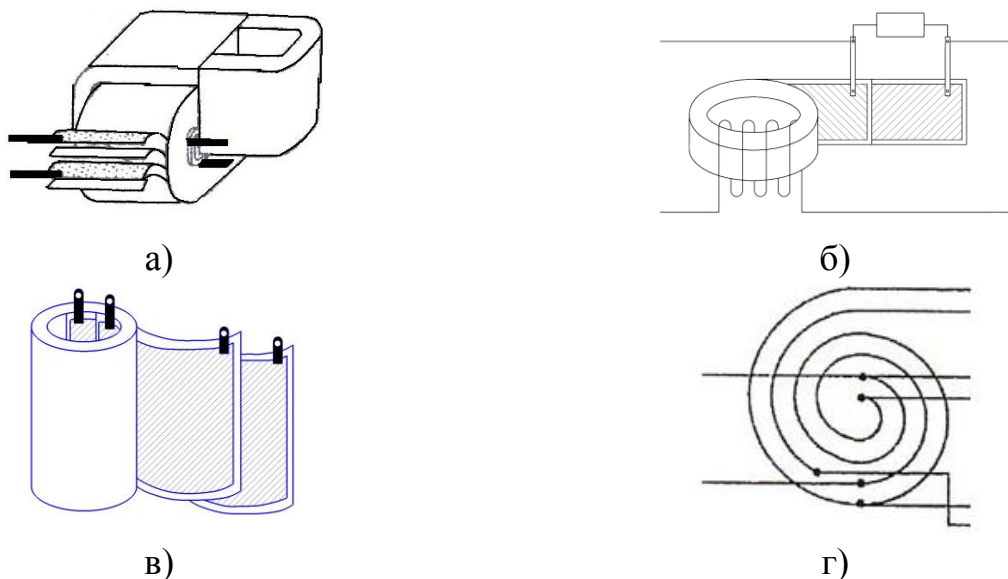


Рисунок 1.14 – Конструкции гибридных ЭМЭ:

- а – конструкция индукона; б – конструкция декона; в – конструкция окна;
г – конструкция спиральной полосковой линии

Приведенные в диссертации расчеты выполнены для находящего все более широкое применение гибридного компонента, представляющего собой интегральный LC-контур.

Известны несколько названий данного компонента: индукон [2, 26], «декон» [27], обмотка-емкость, «окон» [28, 29, 30], спиральная полосковая линия [31 – 35], «каткон» [36 – 42].

«Индукон» выполняется в виде кольцевого сердечника с торцевыми проводящими пластинами, а контура – в виде равномерно намотанной обмотки. В зависимости от того, как подключены обмотки индукона в цепь, он может обладать свойствами конденсатора либо последовательного колебательного контура [43]. При подключении в электрическую цепь начала одной пластины и конца другой индукон ведет себя как последовательная LC -цепь, а при подключении начала или концов пластин индукон ведет себя как конденсатор [44]. Анализ свойств индукона, оценка его технико-экономических показателей и возможностей использования приводятся в [2, 3]. Индукон используется в схемах бесстартерного запуска люминесцентных ламп, малогабаритных ИЕП источник напряжения в источник тока, узлов принудительной коммутации тиристоров, а также в качестве обмотки возбуждения электромагнита ускорителя заряженных частиц [2, 3].

Весьма перспективным является применение индукона в узлах принудительной коммутации вместо коммутирующего конденсатора и позволяющего на этой основе формировать цепи узлов коммутации без дополнительного коммутирующего дросселя. Индукон находит применение в цепях, содержащих конденсаторы и дроссели. Он может использоваться как последовательный колебательный контур или как Т-образная схема включения индуктивностей и емкостей, где емкостные и индуктивные проявляются одновременно [45].

Другой разновидностью ИЕП с частично распределенными параметрами является преобразователь, называемый «декон» (дроссель-конденсатор), состоящий из ленточного пермаллового сердечника особой конструкции и охватывающей его катушки индуктивности. Специфичность конструкции сердечника заключается в том, что ферромагнитные ленты, изготовленные из пермаллоя, изолированы друг от друга диэлектриком и снабжены электрическими

выводами, которые от четных лент или пластин соединены в один вывод, а от нечетных – в другой, при этом один из этих выводов соединен с выводом обмотки индуктивности [27]. На рисунке 1.15 изображен вариант исполнения ИЕП источника напряжения в источник тока на основе «декона», выполненного в виде кольцевого ленточного магнитопровода с намотанной на него обмоткой.

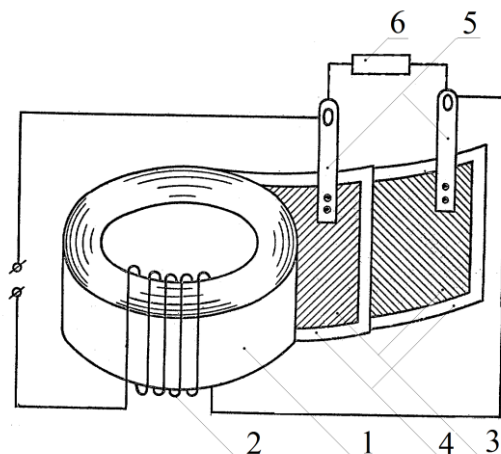


Рисунок 1.15 – ИЕП источника напряжения в источник тока:

1 – кольцевой ленточный магнитопровод; 2 – обмотка; 3 – ферромагнитные ленты; 4 – диэлектрик; 5 – электрические выводы; 6 – нагрузка

Ферромагнитные ленты магнитопровода индуктивности отделены друг от друга диэлектриком и снабжены электрическими выводами, которые являются выводами емкости, настраиваемой в резонанс с индуктивностью обмотки. К выводам подключается нагрузка, которая также может быть подключена параллельно обмотке [46]. Применение «декона» позволяет уменьшить массу и габариты преобразователя.

В [30] рассматриваются схемы узлов принудительной коммутации тиристоров с обмоткой-емкостью («оконом»). Дуализм свойств обмотки-емкости позволяет сформировать вспомогательные цепи узлов коммутации без коммутирующего дросселя, как отдельного конструкционно обособленного выполняемого элемента, что приводит к улучшению массовых и габаритных показателей коммутационных узлов. Симметричность обмотки-емкости относительно начала и концов своих пластин позволяет создать на ее основе коммутационные узлы с повышенной максимально возможной частотой

повторения коммутационных циклов и уменьшить число полупроводниковых коммутирующих приборов.

В [36, 37, 38] рассматриваются конструкция и схема замещения катушки-конденсатора для фильтрокомпенсирующих устройств. Катушка-конденсатор («каткон») представляет собой двухполюсник, состоящий из двух параллельно намотанных и гальванически не связанных катушек и обладающий индуктивными и емкостными свойствами [39, 40]. Фильтрокомпенсирующее устройство на основе каткона выгодно отличается по массогабаритным параметрам от фильтрокомпенсирующих устройств, собранных из компенсаторов реактивной мощности и фильтров высших гармоник на дискретных компонентах [41, 42].

В конце 80-х годов XX века С.Г. Конесевым проведен аналитический обзор и выполнена работа по классификации гибридных LC -компонентов, предложены основные структуры единого конструкторско-технологического компонента, сочетающего в себе свойства всех описанных выше интегральных LC -компонентов и позволяющего реализовывать любые из них, а также создавать новые и предложен для его определения термин «многофункциональный интегрированный электромагнитный компонент» [7, 8]. В данной диссертации предлагается использовать МИЭК, работающий в резонансном режиме, в качестве параметрического стабилизатора тока и усилителя напряжения [7, 9].

На рисунке 1.16 приведены схемы ИЕП, состоящие из элементов LC -контуров, выполненных в виде МИЭК. Индуктивно-емкостный преобразователь, показанный на рисунке 1.16, б, характеризуется более высокой степенью конструкционной и технологической интеграции по сравнению со схемой ИЕП, изображенной на рисунке 1.16, а. Использование МИЭК в данных ИЕП позволяет уменьшить габариты ИЕП, повысить его компактность и технологичность его производства [47].

Научный и практический интерес представляет получение частотных характеристик ИЕП, выполненных на основе различных структур МИЭК, разработка математических моделей расчета энергетических и частотных характеристик и методик расчета МИЭК для создания устройств на основе

МИЭК, а также экспериментальная оценка с целью развития теоретических основ и подтверждения результатов теоретических исследований.

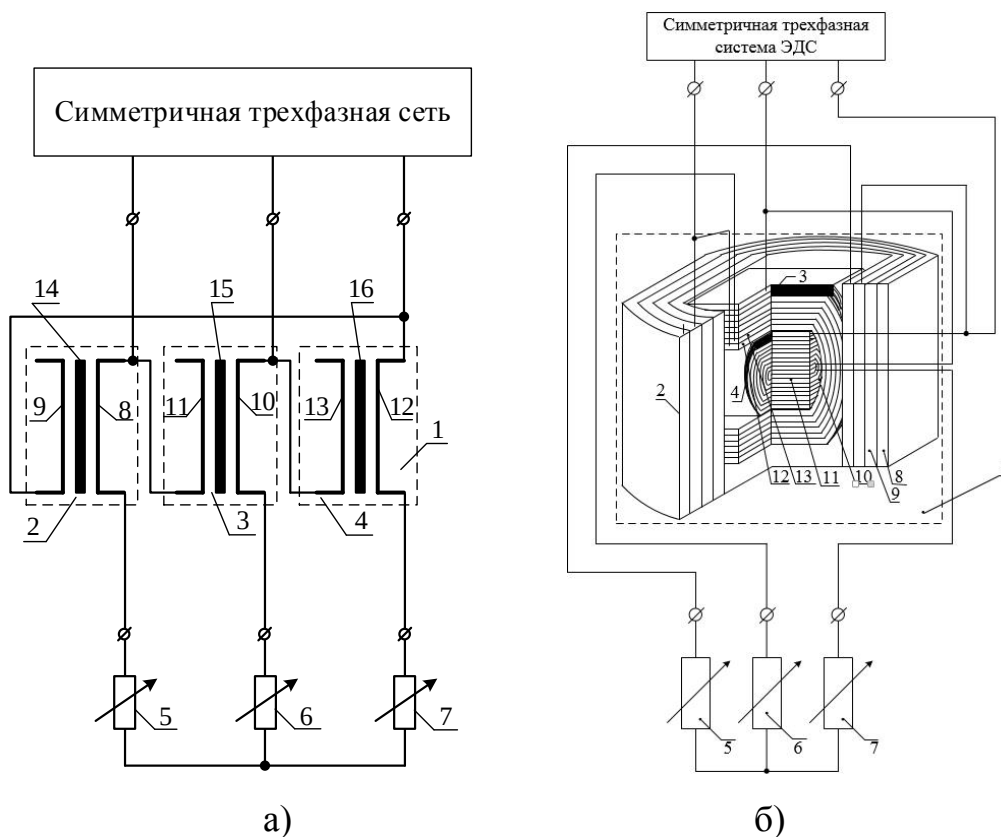


Рисунок 1.16 – Схемы ИЕП на основе МИЭК:

- 1 – МИЭК; 2, 3, 4 – три последовательных колебательных LC -контура;
 5, 6, 7 – трехфазная нагрузка; 8, 10, 12 – первые проводящие обкладки;
 9, 11, 13 – вторые проводящие обкладки; 14, 15, 16 – диэлектрик

1.2 Исследования динамики патентования систем стабилизации тока на основе индуктивно-емкостных преобразователей

В диссертации проводится патентное исследование с глубиной патентного поиска 50 лет. Целью патентных исследований является рассмотрение ССТ с дискретными и гибридными ИЕП. Результаты патентных исследований представлены в виде круговых диаграмм, в том числе по заявителям (рисунок 1.17).

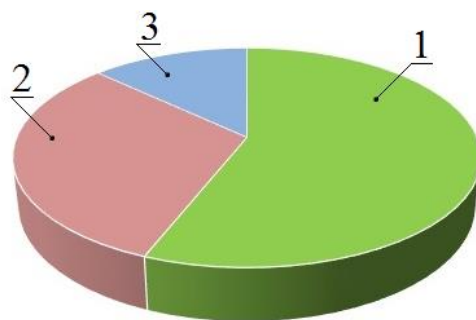


Рисунок 1.17 – Классификация патентов по заявителям:

1 – ВУЗы (56 %); 2 – фирмы и предприятия (31 %); 3 – частные лица (13 %)

Классификация патентов по международной патентной классификации (МПК) показана на рисунке 1.18. Множество рассмотренных по данной теме патентов относятся к МПК *G05F3/06* «Системы без обратной связи для регулирования электрических величин с помощью неуправляемых элементов или неуправляемых комбинаций из саморегулирующихся элементов с помощью комбинированных насыщенных и ненасыщенных индуктивных устройств, например, резонансных цепей», МПК *H02M5/06* «Преобразование энергии переменного тока на входе в энергию переменного тока на выходе, например для изменения напряжения, частоты или числа фаз, выполненных на элементах с полными сопротивлениями» [10].

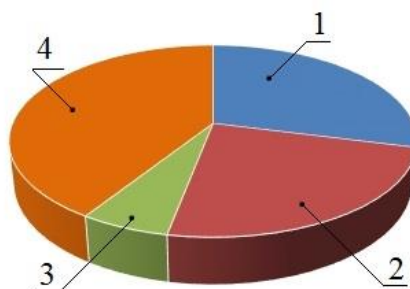


Рисунок 1.18 – Классификация патентов по МПК:

1 – *G05F3/06* (29 %); 2 – *H02M5/06* (24 %); 3 – *G05F1/56* (6 %); 4 – другие (41 %)

Системы стабилизации тока классифицируются следующим образом: первичные источники тока и преобразователи источников напряжения в источники тока [6]. Техническое применение ССТ делит их на крупные группы. Классификация ССТ по типам устройств представлена на рисунке 1.19.

Таким образом, в ССТ неизменность тока осуществляется изменением параметров элементов, входящих в них, такие преобразователи называются параметрическими. Из диаграммы (рисунок 1.20) видно, что наиболее распространенными являются ССТ на основе ИЕП.

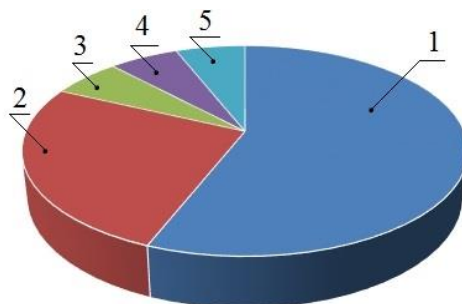


Рисунок 1.19 – Классификация ССТ по типам устройств:

1 – ИЕП (56 %); 2 – авторегулятор импульсный (26 %); 3 – авторегулятор непрерывный (6 %); 4 – параметрический стабилизатор (6 %);
5 – устройство заряда ЕН (6 %)

При проведении патентных исследований определены критерии классификация ИЕП: по функциональному назначению, числу фаз, конструкционному исполнению, типам ЭМЭ (рисунки с 1.20 по 1.25). На рисунке 1.20 приведена классификация ИЕП по критерию функциональности, на рисунке 1.21 – по числу фаз [10].

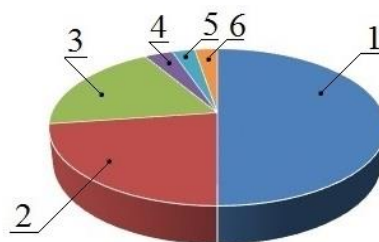


Рисунок 1.20 – Классификация ИЕП по функциональному назначению:

1 – стабилизация тока (50 %); 2 – плавное регулирование уровня тока в переменной нагрузке (23 %); 3 – ступенчатое регулирование уровня тока в переменной нагрузке (19 %); 4 – функция симметрирования режима в питающей многофазной сети (3 %); 5 – функция частотных преобразований (3 %); 6 – стабилизация входной/выходной мощности и увеличение диапазона стабилизации тока путем изменения внешней характеристики (2 %) [10]

По принципу действия и построения гибридные ЭМЭ подразделяются на МЭТ и интегральные *LC*-компоненты, в которых используется совокупность физических явлений пассивных элементов – дросселя и конденсатора [48, 49, 50].

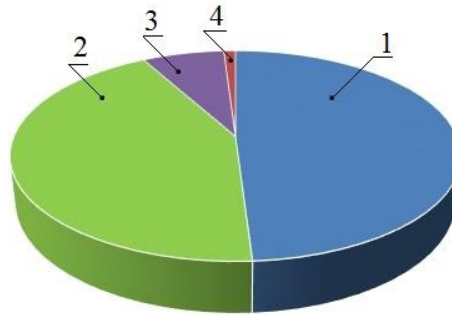


Рисунок 1.21 – Классификация ИЕП по числу фаз:

1 – многофазные (49 %, из них трехфазные – 46 %), 2 – однофазные (43 %),
3 – $n \rightarrow m$ -фазные ИЕП (7 %), 4 – условно-многофазные ИЕП (1 %)

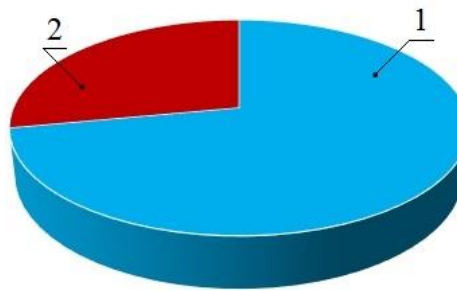


Рисунок 1.22 – Классификация ИЕП по конструкционному исполнению:

1 – с магнитной связью между индуктивными элементами схемы (72 %),
2 – без взаимноиндуктивной связи (28 %)

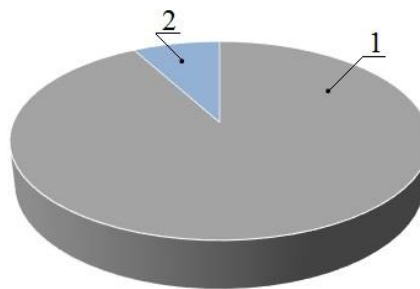


Рисунок 1.23 – Классификация ИЕП по типам ЭМЭ:

1 – ИЕП на основе дискретных ЭМЭ (92 %),
2 – ИЕП на основе гибридных ЭМЭ (8 %)

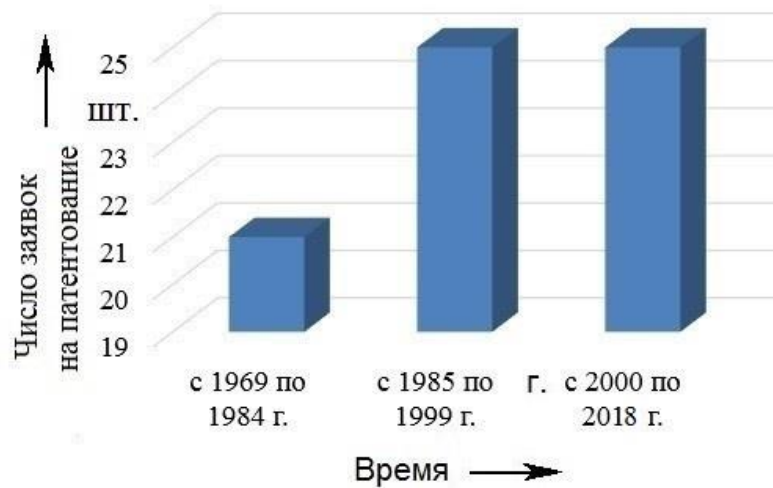


Рисунок 1.24 – Распределение патентования за период с 1969 по 2018 гг. [51]

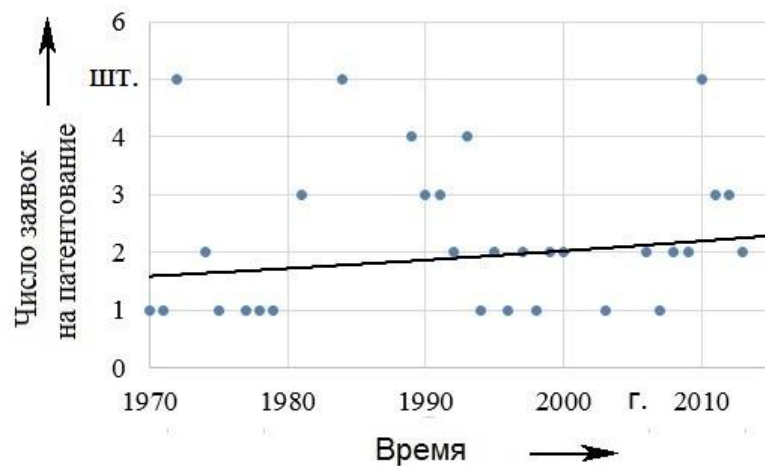


Рисунок 1.25 – Динамика подачи заявок на патентование ИЕП на основе МИЭК

Таким образом, актуальной задачей является определение основных параметров и характеристик ИЕП, построенных на основе гибридных ЭМЭ, для применения в ССТ.

1.3 Основные параметры и характеристики индуктивно-емкостных преобразователей

Области применения ИЕП определяют требования к их параметрам и характеристикам, которые, в свою очередь, зависят от схемных решений ИЕП, соотношений индуктивного и емкостного сопротивлений, частоты источника

питания [10, 13, 52]. Проведен анализ характеристик, показателей и параметров ИЕП.

К энергетическим показателям ИЕП относятся КПД (от 98 до 100 %), коэффициент мощности (от 0,98 до 1), коэффициент использования (от 0,8 до 1,0), коэффициент связи для схем с взаимоиндуктивной связью (от 0,8 до 1,0) [53].

К массогабаритным показателям ИЕП относятся габариты (длина, ширина, высота) и масса.

Для ИЕП, предполагаемых для использования в системах электроснабжения, значимыми показателями являются показатели качества электрической энергии.

Кроме того, МИЭК выполняет роль LC -контура, что позволяет создавать ИЕП на его основе при снижении расхода электропроводящих, изоляционных и конструкционных материалов. Параметры, характеризующие ИЕП как резонансный (колебательный) контур, приведены на рисунке 1.26.

Индуктивно-емкостный преобразователь на основе МИЭК рассматривается как четырехполюсник. Основные параметры ИЕП как четырехполюсника – входное и передаточное сопротивления, передаточная проводимость. Для правильной работы ИЕП важно снижение входного и передаточного сопротивлений и увеличение передаточной проводимости с ростом частоты [54].

При разработке инженерных методик расчета и алгоритмов проектирования ИЕП требуется проверять выполнение обязательного условия работы ИЕП в режиме короткого замыкания (снижение входного и передаточного сопротивлений с увеличением частоты), а также осуществлять оценку коэффициента стабилизации и влияния на его значение изменения сопротивления нагрузки [21]. Стабильность тока нагрузки ИЕП при отклонении частоты питающей сети зависит от вариантов соединения реактивных элементов, образующих структуру ИЕП и от схемы подключения источника питания [55, 56, 57]. В связи с тем, что ИЕП состоит из ЭМЭ с частотнозависимыми параметрами и работает эффективно только на резонансной частоте, актуальной задачей является исследование характеристик ИЕП при изменении частоты [53, 54, 58].

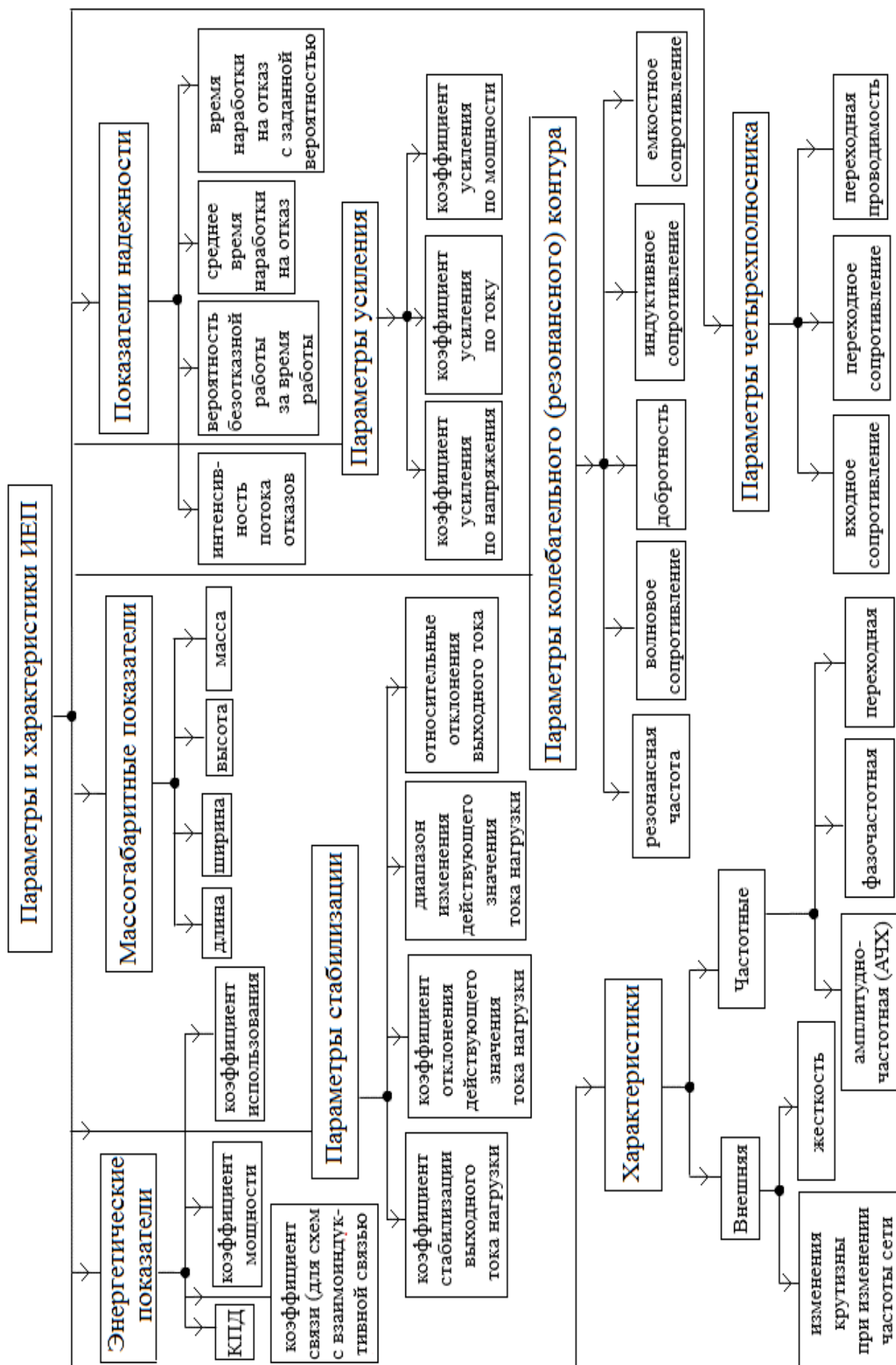


Рисунок 1.26 – Основные параметры и характеристики ИЭП

Наглядно оценить стабилизирующие свойства можно с помощью частотных характеристик ИЕП. Например, повышение крутизны вольт-амперной характеристики источника питания увеличивает динамическую устойчивость дуги [59, 60]. Следовательно, актуальной задачей является исследование частотных характеристик МИЭК и оценка стабилизирующих свойств ИЕП на их основе.

Основными задачами исследования являются построение и анализ частотных характеристик односекционной и двухсекционной структур МИЭК, расчет коэффициента стабилизации по току ИЕП на базе МИЭК, экспериментальное подтверждение адекватности разработанных математических моделей.

К показателям, являющимся значимыми для ИЕП, применяемых в ССТ, относятся параметры стабилизации: коэффициенты отклонения действующего значения тока нагрузки и стабилизации тока нагрузки [6, 53].

К ИЕП, применяемым в ССТ, предъявляются следующие требования: простота конструкции (не более четырех ЭМЭ), высокая надежность, низкая масса и малые габариты, высокий коэффициент мощности (от 0,98 до 1) и КПД, средняя добротность колебательного контура (от 20 до 100), компенсация реактивной мощности, наибольший стабилизации по току (от $0,7 \cdot f_{\text{рез.}}$ до $1,3 \cdot f_{\text{рез.}}$), стабилизация тока большой амплитуды (единицы-десятки ампер), уменьшение сопротивления с ростом частоты [53, 54, 55, 61]. Выполнение всех требований нельзя обеспечить в полной мере. Например, ИЕП, который стабилизирует ток в широком диапазоне изменения частоты, стабилизирует ток меньшей амплитуды [59, 62]. Показатели, являющиеся значимыми для ИЕП, применяемых в ССТ, показаны на рисунке 1.26.

Расширить диапазон изменения сопротивления нагрузки, в котором сохраняется высокий коэффициент стабилизации выходного тока нагрузки, повысить надежность, снизить массу и габариты ИЕП позволяют такие технические средства, как использование более современных материалов и элементной базы, повышение частоты преобразования электроэнергии,

применение энергетически эффективных режимов работы, функциональная (физическая, конструкционная и технологическая) интеграция ЭМЭ [7, 9, 56].

Перспективным является применение гибридных ЭМЭ в ИЕП для ССТ, поскольку позволяет регулировать работу ИЕП в широком диапазоне настроек, появляется возможность трансформации электрической энергии, изменения и настройки параметров резонансного контура при изменении сопротивления нагрузки [53, 55]. Весьма перспективным направлением развития является создание ИЕП из МИЭК, чтобы повысить надежность, снизить массу и уменьшить габариты, улучшить стабилизационные свойства ИЕП [63].

В ходе аналитического обзора выявлены основные параметры и характеристики ИЕП, которые необходимо учитывать при проектировании и разработке ССТ на основе ИЕП, пути улучшения их параметров и характеристик и основные тенденции развития ИЕП [62]. Анализ основных параметров и характеристик ИЕП, построенных на основе гибридных ЭМЭ, показал, что для ИЕП, применяемых в ССТ, важными являются следующие параметры и характеристики: энергетические показатели и параметры надежности, параметры стабилизации, показатели качества электрической энергии [53].

1.4 Методы исследования индуктивно-емкостных преобразователей на основе гибридных электромагнитных элементов

Для расчета электромагнитных процессов (ЭМП), происходящих в электротехнических системах и устройствах, используют цепные и полевые методы. Однако, расчет ЭМП в сложных системах цепными методами не позволяет понять сущность физических процессов, а именно выяснить, что происходит внутри многополюсника. Кроме того, применение цепных методов для расчета характеризуется большей погрешностью по сравнению с полевыми методами в связи с использованием упрощенной картины магнитного поля [64].

Применение полевых методов для расчета ЭМП, напротив, позволяет получить более точные результаты, в отличие от цепных методов. Однако

создание простых и точных математических моделей для исследования характеристик сложных электротехнических систем и устройств является трудоемкой задачей в связи со значительным объемом вычислений, затрудняющим оптимизацию процесса проектирования подобных систем и устройств, несмотря на высокий уровень современных компьютерных технологий.

Полевые методы основаны на уравнениях Максвелла, предложенных в 60-х гг. XIX века и подразделяются на аналитические и численные. При этом наиболее распространены аналитические методы, которые не подходят для инженерных расчетов. Для исследования ЭМП в сложных электротехнических системах и устройствах все большее распространение получают численные методы моделирования, что обусловлено интенсивностью развития ЭВМ и совершенствованием программных пакетов, без которых большинство методов неприменимы на практике. Кроме того, численные методы расчета удовлетворяют новым требованиям, связанным с тенденцией ресурсо- и энергосбережения, снижения массы и геометрических размеров и повышения надежности технических систем и устройств.

Наиболее распространенными численными методами являются:

- метод конечных элементов, использующий дифференциальные уравнения второго порядка в частных производных;
- метод сеток, основанный на применении двумерных дифференциальных уравнений в частных производных.

Анализ динамики патентования ИЕП и ССТ на их основе показал, что в настоящее время наблюдается увеличение числа разработок электротехнических систем и устройств на основе гибридных ЭМЭ [32, 35, 44, 49, 65, 66, 67]. Следовательно, становится актуальной задача исследования ЭМП, происходящих в них. Для решения данной задачи эффективнее использовать полевые методы, позволяющие лучше понять физику процессов и повысить точность формул, применяемых в традиционных методиках, используемых для расчета систем и устройств на дискретных ЭМЭ. Чем сложнее по конструкции гибридный ЭМЭ,

тем целесообразнее использование полевых методов расчета, но для гибридных ЭМЭ и устройств на их основе, подробно описанных в [36], существующих методов расчета не так много.

В связи с тем, что гибридные ЭМЭ представляют собой многополюсники, состоящие из слоев проводящих и изоляционных материалов, имеющие электрические выводы, к которым подключены источник питания, коммутационная аппаратура и нагрузка, ЭМП в них описываются системой уравнений Максвелла, которая имеет вид [68]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \operatorname{div} \vec{B} = 0, \\ \operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{E}}{\partial t}, \\ \operatorname{div} \vec{D} = \rho_{\text{стоп.}}, \\ \operatorname{rot} \vec{H} = \vec{j}_{\text{стоп.}} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}, \\ \vec{D} = \varepsilon_0 \cdot \vec{E} + \vec{P}, \\ \vec{B} = \mu_0 \cdot (\vec{H} + \vec{M}). \end{array} \right.$$

Уравнения Максвелла целесообразно решать в ограниченных поверхностях, объединяя их в систему граничными условиями:

$$\begin{aligned} \vec{n} \cdot (\vec{D}_1 - \vec{D}_2) &= \sigma, \\ [\vec{n}, (\vec{E}_1 - \vec{E}_2)] &= 0, \\ \vec{n} \cdot (\vec{B}_1 - \vec{B}_2) &= 0, \\ [\vec{n}, (\vec{H}_1 - \vec{H}_2)] &= \vec{i}, \end{aligned}$$

При определении граничных условий используют интегральную формы уравнений Максвелла

$$\int \operatorname{div} \vec{D} dV = \int D_n dS = \int \rho dV = Q,$$

где Q – суммарный заряд внутри объема интегрирования.

Для исследования ЭМП в гибридных ЭМЭ возможно также использование многомодовых моделей, обеспечивающих поэтапное решение:

- определение собственных векторов функций (краевая задача электродинамики) численными методами (в связи со сложностью структуры гибридных ЭМЭ);

- нахождение коэффициентов разложения электромагнитного поля.

Для решения краевой задачи для гибридных ЭМЭ, работающих в резонансном режиме, в настоящее время применяют варианты проекционно-сеточного метода. К основным из них относятся вариационный метод, метод конечных разностей, интегральный метод, метод конечных элементов.

Наряду с методами, перечисленными выше, используется также численно-аналитический метод разложения индуцированного тока в ряды Фурье для получения АЧХ и ФЧХ с целью выявления математической зависимости закона изменения во времени амплитуды и фазы колебаний.

В дополнение к полевым методам для исследования характеристик сложных электротехнических систем и устройств широко используется метод регрессионных моделей. В регрессионной модели не учитывается сущность процессов. Данная модель способна описать системы и устройства высокой сложности. Использование данного метода расчета ЭМП в гибридных ЭМЭ и электротехнических устройствах и системах на их основе является наиболее эффективным с точки зрения простоты и точности, а порой единственно возможным в связи с невозможностью в ряде случаев создания точных моделей с применением других методов и трудоемкостью расчетов при использовании вычислительных методов в других случаях. Это связано со спецификой электромагнитных систем, которые невозможно разделить на отдельные независимые элементы из-за концентрации электромагнитного поля в пространстве. Следовательно, применение регрессионных моделей эффективно для исследования ЭМП, синтеза и оптимизации сложных структур гибридных ЭМЭ [69].

Одними из перспективных с точки зрения применения в электротехнических системах и устройствах гибридных ЭМЭ, помимо МЭТ, являются МИЭК [2, 58]. Актуальной задачей является разработка алгоритмов проектирования электротехнических устройств с помощью многомодовых моделей, учитывающих многовариантность структур МИЭК [58, 60].

Для расчета ЭМП в ИЕП на основе МИЭК цепными методами используют линейные алгебраические уравнения, составленные по законам Кирхгофа на основе схем замещения МИЭК на дискретных компонентах. Основные величины, относительно которых записываются уравнения: токи в элементах схемы, емкости, индуктивности и активные сопротивления первичной и вторичной обкладок МИЭК соответственно; напряжение питания; сопротивление нагрузки. Однако, МИЭК является многополюсником, поэтому при исследовании цепными методами работы ИЕП на основе МИЭК невозможно получить информацию о происходящих внутри МИЭК ЭМП.

Для расчета ЭМП в ИЕП на основе МИЭК могут также использоваться системы дифференциальных уравнений, основанные на представлении МИЭК как системы с распределенными параметрами. Основные величины, относительно которых записываются уравнения: элементарная емкость $C_0 \cdot dx$, элементарная индуктивность $L_0 \cdot dx$ каждой обкладки на выделенном элементе, напряжение между обкладками u , напряжение между выводами одной обкладки $u_{пл.}$, средний ток вдоль всей длины обкладки $i_{ср.}$, электродвижущая сила самоиндукции, развиваемая на концах обкладки E , напряжение на нагрузке u_n , разность потенциала между проводниками u_c , емкостный ток между фольговыми проводниками i_c [38]. Описание ЭМП в ИЕП на основе МИЭК системой дифференциальных уравнений приводит к достаточно громоздким математическим выкладкам.

В данной диссертации для расчетов ЭМП в ИЕП на основе двухсекционных МИЭК используются системы линейных алгебраических уравнений, составленные на основе интегральных параметров МИЭК, к которым относятся общая емкость, общая индуктивность обкладок, входные и выходные токи. Впервые этот подход применен Бердниковым в [30] для расчета ЭМП в односекционном МИЭК («оконе»). Преимущества данного метода заключаются в простоте и точности расчета более сложных схем МИЭК без описания ЭМП системой дифференциальных уравнений 3-го или 4-го порядков.

Данный метод расчета подробно рассмотрен в главе 3 данной диссертации. В главе 3 выполнено подтверждение адекватности разработанных математических моделей, использующих системы линейных алгебраических уравнений, составленных на основе интегральных параметров, для расчета сложных структур МИЭК.

1.4.2 Анализ методов оценки показателей надежности сложных компонентов и систем

Для оценки надежности технических систем и устройств важны аналитические методы в связи с низкой точностью и достоверностью методов имитационного и компьютерного моделирования [59, 63]. Однако аналитические методы характеризуются значительным числом недостатков:

- анализ надежности осуществим только для систем, обладающих простой структурой;
- трудоемкость построения и изучения нестационарных показателей надежности;
- невозможность анализа и изучения систем с переменной структурой;
- отсутствие универсальной математической модели надежности функционирования систем;
- сложность методов, обусловленная отсутствием разработанных и внедренных алгоритмов и программ для ЭВМ.

Оценка надежности работы сложных систем с большим числом состояний требует создания новых методов анализа, требуемой точностью [66]. Сложная электротехническая система является, как правило, многофункциональной. С одной стороны, в реализации каждой из множества функции принимает участие значительное число ЭМЭ. С другой стороны, один ЭМЭ (как правило, гибридный) выполняет множество разнообразных функций [66]. Следовательно, ЭМЭ, работающие в составе системы или устройства, характеризуются различными сроками эксплуатации и долговечностью работают разное время. Для оценки надежности многофункциональных сложных электротехнических систем используется исследование надежности отдельно для каждой функции. Такой

подход получил название функциональный, сущность которого заключается в определении вектора показателей надежности по всем функциям, выполняемым системой. При этом необходимо учитывать, что в случае использования функционального подхода для оценки надежности систем, характеризующихся одинаковым применением, усложняется сравнительный анализ их работы. Кроме того, особенность сложных электротехнических систем заключается в долгом времени работы (десятки тысяч часов), а также в требовании к безотказной работе для безопасности, экологичности и повышения качества [66]. Несмотря на постоянное повышение надежности ЭМЭ и снижение потока их отказов за счет создания современных материалов, требования, предъявляемые к показателям надежности сложных электротехнических систем постоянно возрастают [66, 71]. В настоящее время в теории надежности возникают тенденции оценки надежности технических систем с переменной структурой [72].

Выводы по главе 1 и постановка задач исследования

1. Выполнен обзор областей применения ИЕП в электротехнике и электроэнергетике. Установлены требования, предъявляемые к ИЕП для ССТ. Определены основные параметры и характеристики ИЕП, которые необходимо учитывать при проектировании и разработке ССТ на основе ИЕП.

2. Выявлены пути улучшения параметров и характеристик ИЕП и основные тенденции развития ИЕП. Показана эффективность параметрических стабилизаторов тока на основе гибридных ЭМЭ для решения задач стабилизации тока. Обосновано применение функциональной интеграции ЭМЭ для разработки ИЕП. Показано, что недостатки ИЕП (большая масса и крупные габариты) устраняются за счет повышения частоты преобразования и гибридного исполнения ЭМЭ, выполняющих функцию ИЕП.

3. Выполнены патентные исследования методов, систем и устройств стабилизации тока на основе ИЕП. Проведен анализ динамики патентования ИЕП для ССТ, по результатам которого выявлена и подтверждена перспективность

направления создания ССТ с ИЕП на основе гибридных ЭМЭ, показано увеличение числа заявок на патентование подобных систем за последние 20 лет. Предложена классификация ИЕП по функциональному назначению, числу фаз, конструкционному исполнению, типам ЭМЭ. По результатам анализа гибридных ЭМЭ произведен выбор гибридного ЭМЭ, называемого МИЭК, для построения ССТ с ИЕП, выполненных на основе базовых структур МИЭК.

4. По результатам оценки методов анализа ЭМП, происходящих в ИЕП на основе МИЭК, выполнен выбор простого, эффективного и точного метода расчета ЭМП, использующего системы линейных алгебраических уравнений, составленных на основе интегральных параметров МИЭК, к которым относятся общая емкость, общая индуктивность обкладок, входные и выходные токи.

Целью работы является повышение эффективности систем стабилизации тока на основе индуктивно-емкостных преобразователей методами функциональной интеграции электромагнитных элементов.

Данная цель определила следующие задачи исследования:

- аналитический обзор и патентные исследования методов и систем стабилизации тока на основе ИЕП;
- разработка новых технических решений ИЕП, стабилизирующих ток нагрузки в широком диапазоне изменения сопротивления нагрузки, при повышении надежности и улучшении массогабаритных показателей;
- исследование на основе созданных математических и компьютерных моделей режимов работы и характеристик разработанных ИЕП;
- разработка методик расчета электрических параметров гибридного ЭМЭ, выполняющего функцию ИЕП;
- экспериментальные исследования для подтверждения достоверности полученных результатов и адекватности созданных математических и компьютерных моделей.

ГЛАВА 2 РАЗРАБОТКА ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ИНДУКТИВНО-ЕМКОСТНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ДЛЯ СИСТЕМ СТАБИЛИЗАЦИИ ТОКА

Потребители электрической энергии, требующие неизменности тока при изменении сопротивления разнообразны, а конфигурация систем стабилизации тока изменяется в зависимости от объекта, что требует индивидуального подхода в разработке индуктивно-емкостных преобразователей.

Основные характеристики ИЕП приведены в пункте 1.3 главы 1. К ним относятся энергетические и массогабаритные показатели, параметры стабилизации и усиления, показатели надежности. Следует также учитывать особенности режимов работы электротехнических устройств, в составе которых используются ИЕП, и области применения ИЕП (электротехнологии, электропривод, электроснабжение, преобразовательная и импульсная техника), которые влияют на значение электрических параметров ИЕП.

2.1 Определение требований к индуктивно-емкостным преобразователям для создания систем стабилизации тока на их базе

С учетом особенностей применения ИЕП, приведенных выше, и по результатам анализа, приведенного в главе 1, сформулированы требования, предъявляемые к ИЕП, к которым относятся:

- схемная и конструкционная простота, обеспечивающая высокую эксплуатационную надежность, малую массу и небольшие габариты [6];
- высокая стабильность и возможность регулирования тока в широком диапазоне изменения сопротивления нагрузки [6];
- высокие КПД и коэффициент мощности;
- электромагнитная совместимость с сетью и минимальные искажения напряжений, вносимые в питающую сеть;

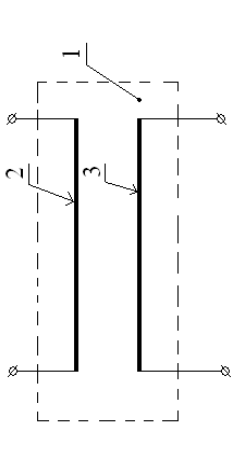
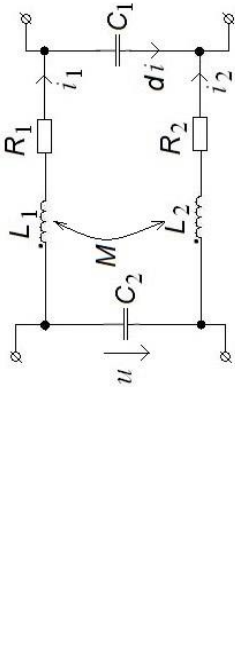
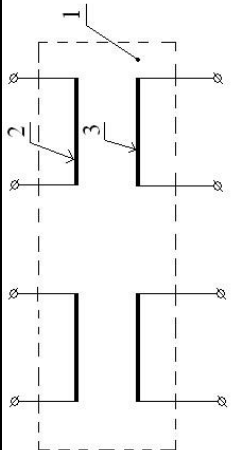
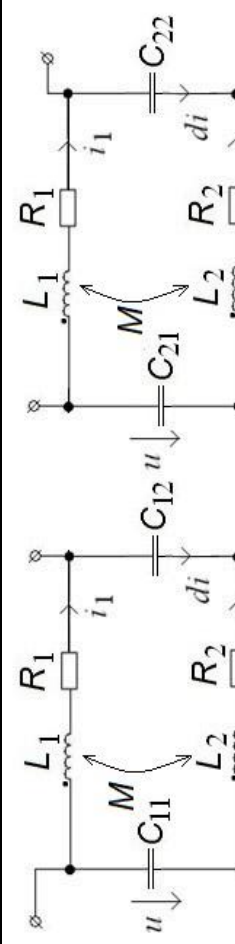
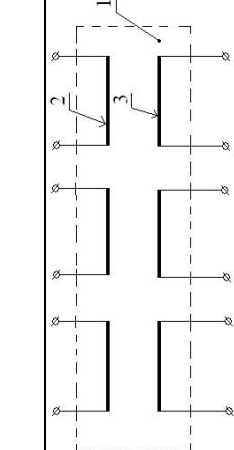
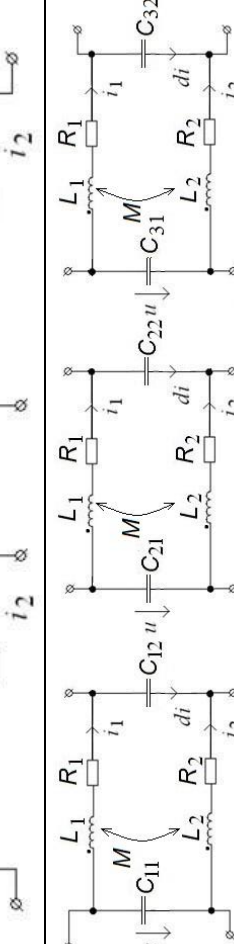
- обеспечение необходимых режимов работы, в том числе устойчивость к коротким замыканиям в цепи нагрузки, возможность работы на холостом ходу без принятия специальных мер и использования одних и тех же ИЕП как в режиме «прямого», так и «обратного» преобразования, возможность параллельной работы блоков ИЕП для регулирования и резервирования.

В данной диссертации оцениваются перечисленные выше основные требования, предъявляемые к ИЕП. Задачи выполнения данных требований решаются применением методов функциональной интеграции ЭМЭ [9]. Существует ряд публикаций, в которых предлагаются различные способы конструкционной и технической реализации идеи создания работоспособных ИЕП с полностью или частично распределенными параметрами [2, 3, 27]. Уменьшить массу и габариты ИЕП, повысить надежность возможно благодаря исполнению ИЕП на основе гибридного ЭМЭ, работающего в резонансном режиме, представляющего собой колебательный LC -контур. Предлагается использование гибридного ЭМЭ, называемого «многофункциональный интегрированный электромагнитный компонент» [7, 43, 44]. Благодаря особенностям технического исполнения и реализации различных структур МИЭК можно обеспечить увеличение диапазона изменения сопротивления нагрузки, при котором сохраняется высокий коэффициент стабилизации тока нагрузки, достигается повышение надежности, улучшение массогабаритных показателей ССТ, что недоступно с применением дискретных ЭМЭ.

2.2 Анализ базовых структур и выбор многофункционального интегрированного электромагнитного компонента

С помощью базовых структур МИЭК, представляющих собой LC -контур, реализуется силовая пассивная часть источников вторичного электропитания, что позволяет уменьшить расход электротехнических (проводниковых и диэлектрических) и конструкционных материалов [7, 8, 44]. Базовые структуры МИЭК и их уточненные схемы замещения приведены в таблице 2.1 [73, 74].

Таблица 2.1 – Базовые структуры МИЭК и их уточненные схемы замещения

Номер пункта	Наименование	Схемотехническое исполнение (в развертке)*	Уточненная схема замещения
1	Односекционное исполнение МИЭК		
2	Двухсекционное исполнение МИЭК		
3	Трёхсекционное исполнение МИЭК		
ПРИМЕЧАНИЕ:			
1 – МИЭК; 2, 3 – Первая и вторая проводящие обкладки;			
* – На схемотехническом исполнении в развертке магнитная связь не показана (считаем, что магнитная связь есть, коэффициент связи катушек $k = 0,9$)			
$C = C_1 + C_2 = C_{11} + C_{12} = C_{21} + C_{22} = C_{31} + C_{32}$ – общая емкость МИЭК			

Исследуется МИЭК, состоящий из нескольких магнитосвязанных секций, каждая из которых содержит две проводящие обкладки, свернутые в спираль и разделенные диэлектриком. Изменяя количество секций, способ их подключения, можно регулировать параметры LC -контура, исследовать различные варианты включения компонента в схему устройства.

Односекционная структура МИЭК, применяемая в качестве ИЕП подробно исследована в трудах отечественных и зарубежных ученых и позволяет реализовать различные схемы ИЕП дискретного и гибридного исполнения, рассмотренные в пункте 1.1 главы 1 данной диссертации. При подключении начала первой проводящей обкладки и конца второй проводящей обкладки односекционного МИЭК к источнику питания и при подключении нагрузки к концам обеих проводящих обкладок односекционный МИЭК (рисунок 2.1, а) работает как Г-образная схема Бушера, приведенная на рисунке 1.3, а. При этом гибридное исполнение позволяет уменьшить массу и габариты ИЕП.

При подключении начала первой проводящей обкладки и конца второй проводящей обкладки односекционного МИЭК к источнику питания и при подключении конца первой проводящей обкладки и начала второй проводящей обкладки к нагрузке односекционный МИЭК (рисунок 2.1, б) ведет себя как мостовая схема Штейнметца, показанная на рисунке 1.3, г.



Рисунок 2.1 – Схемы ИЕП, выполненные на основе односекционной структуры МИЭК:

а – Г-образная схема Бушера; б – мостовая схема Штейнметца
1 – МИЭК, 2, 3 – первая и вторая проводящие обкладки

Таким образом, гибридное исполнение позволяет получить различные схемотехнические решения ИЕП без изменений состава и вариантов включения ЭМЭ схемы.

В данной диссертации исследуется ИЕП на основе двухсекционной структуры МИЭК, позволяющей реализовать множество вариантов схем ИЕП, отличающихся вариантами соединения секций МИЭК и подключением источника питания и нагрузки к секциям МИЭК [3]. Каждая секция двухсекционного МИЭК представляет собой две проводящие обкладки, разделенные диэлектриком и свернутые в спираль, с электрическими выводами в начале и в конце каждой обкладки. Также все секции имеют магнитную связь [60].

Существуют несколько способов конструкционного исполнения двухсекционной структуры МИЭК. В первом случае обе секции размещают на одном каркасе путем намотки одной секции на другую (рисунок 2.2, а). При одинаковом числе витков вследствие большего диаметра намотки вторая секция имеет большую индуктивность и емкость. Во втором случае изготавливают две одинаковые секции МИЭК с идентичными электрическими параметрами, размещенные на отдельных каркасах с общим магнитопроводом (рисунок 2.2, б).

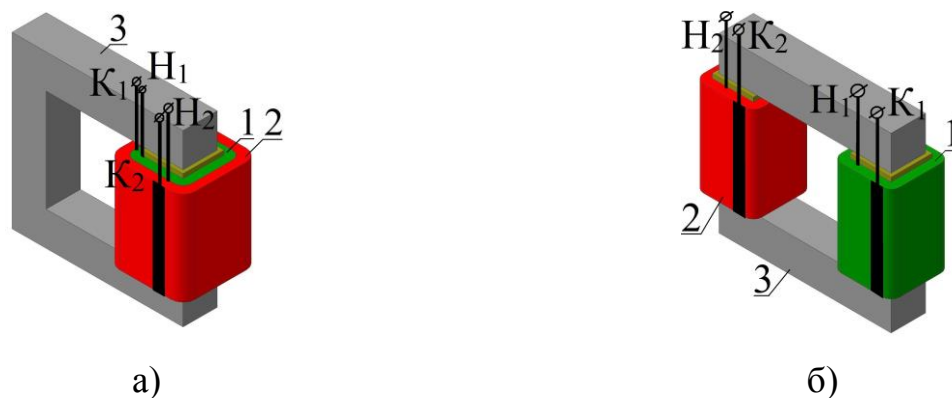


Рисунок 2.2 – Конструкционные исполнения двухсекционной структуры МИЭК:

а – общий вид двухсекционного МИЭК с двумя секциями, размещенными на одном каркасе; б – общий вид двухсекционного МИЭК с идентичными электрическими параметрами

1 – первая секция, 2 – вторая секция, 3 – магнитопровод, H₁, H₂ и K₁, K₂ – начала и концы первой и второй проводящих обкладок соответственно

2.3 Разработанные технические решения индуктивно-емкостных преобразователей для систем стабилизации тока

Аналитический обзор, приведенный в главе 1, показал перспективность направления функциональной интеграции ЭМЭ для разработки технических решений ИЕП, применяемых в системах стабилизации тока.

По результатам изучения описания патентов, технические решения в которых наиболее приближены к решаемым в данной диссертации задачам, произведен выбор аналогов и прототипов, разработаны основные технические решения ИЕП для систем стабилизации тока.

Разработан и запатентован ИЕП, содержащий источник питания 1, МИЭК 2, состоящий из двух проводящих обкладок 3 и 5, коммутационные блоки 4 и 6, блок управления и контроля 7, датчики тока и напряжения 8 и 9, нагрузку 10 (рисунок 2.3) [75]. Особенностью предложенного технического решения является использование в качестве ИЕП работающего в резонансном режиме МИЭК.

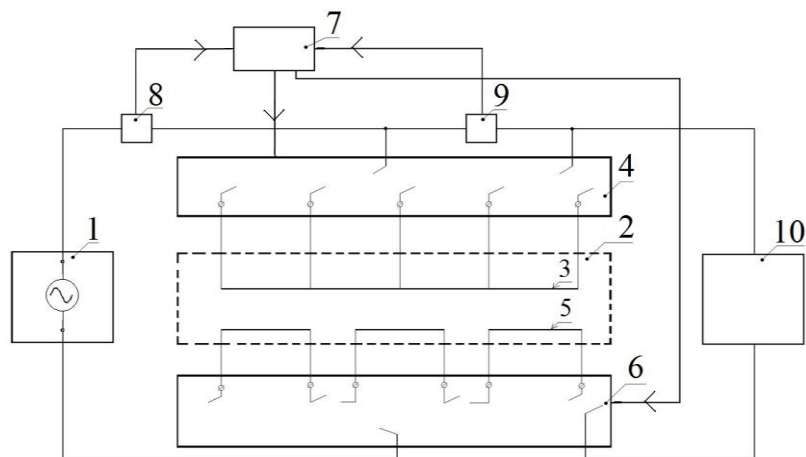


Рисунок 2.3 – Система стабилизации тока на основе разработанного ИЕП:

- 1 – источник питания; 2 – МИЭК; 3, 5 – первая и вторая проводящие обкладки;
4, 6 – коммутационные блоки; 7 – блок управления и контроля;
8, 9 – датчики тока и напряжения; 10 – нагрузка

Применение МИЭК позволяет поддерживать в цепи резонанс при изменении величины нагрузки за счет возможности вариации значений емкости и

индуктивности с помощью блока управления и контроля путем подключения различных выводов проводящих обкладок коммутационными блоками. Применение МИЭК также позволяет уменьшить массу и габариты устройства, повысить надежность за счет уменьшения числа компонентов, глубокой интеграции элементов при обеспечении регулирования резонансной частоты устройства в широких пределах и возможности регулирования уровня выходного напряжения. Это достигается тем, что трансформаторный и конденсаторный блоки ИЕП выполнены в виде многосекционного МИЭК с электрическими выводами, расположенными по всей длине обкладки. В случае необходимости регулирования выходного тока ИЕП блок управления и контроля задает новые параметры, подает сигнал на коммутационные блоки для подключения выводов проводящих обкладок МИЭК в соответствии с новыми значениями емкости и индуктивности [49].

В режиме холостого хода или в режимах близких к холостому ходу значительно возрастает напряжение МИЭК. Это может привести к выходу из строя ИЕП и к повреждению подключенной нагрузки. Реализовано снижение уровня резонансного напряжения и тока, что позволяет предложенному ИЕП работать в режиме холостого хода. Если напряжение на обкладках МИЭК возрастает значительно и становится выше допустимого, блок управления и контроля, получив соответствующую информацию с датчиков тока и напряжения, подает сигнал на коммутационные блоки для перекоммутации электрических выводов проводящих обкладок МИЭК с новыми значениями емкости и индуктивности [49].

На рисунке 2.4 представлена схема разработанного ИЕП на основе двухсекционной структуры МИЭК (патент РФ на изобретение № 2632412), которая позволяет создать более тридцати вариантов схем ИЕП с различными параметрами без изменения состава и количества элементов, входящих в схему ИЕП. Показанный на рисунке 2.4, а, ИЕП состоит из источника питания, нагрузки, МИЭК, выполненного из проводящих обкладок, свернутых в спираль и

разделенных диэлектриком (на рисунке не указан), с выводами, расположенными в началах и в концах обкладок. При этом МИЭК содержит две секции, каждая из которых состоит из первой и второй проводящих обкладок. Источник питания подключен к началу первой проводящей обкладки первой секции и к концу второй проводящей обкладки первой секции.

Схемотехническое исполнение ИЕП, показанное на рисунке 2.4, б, характеризуется более широким диапазоном изменения частоты (от $0,75 \cdot f_{рез.}$ до $1,35 \cdot f_{рез.}$) по сравнению со схемами ИЕП, представленными на рисунках 2.4, а, (от $0,98 \cdot f_{рез.}$ до $1,02 \cdot f_{рез.}$) и 2.4, в, ($0,985 \cdot f_{рез.}$ до $1,003 \cdot f_{рез.}$).

Схемотехническое исполнение ИЕП, показанное на рисунке 2.4, в, характеризуется большим коэффициентом усиления по напряжению по сравнению с ИЕП, представленными на рисунках 2.4, а, ($k_{U3} = 75 > k_{U1} = 20$) и 2.4, б, ($k_{U3} = 75 > k_{U2} = 13,5$), стабилизирует больший по амплитуде ток ($i_{L3} = 1,23 > i_{L1} = 0,352 > i_{L2} = 0,235$) и является наиболее оптимальным, если требуется значительное увеличение напряжения.

Максимальный коэффициент усиления по напряжению достигается при параллельном соединении проводящих обкладок обеих секций МИЭК с подключением источника питания к началам первичных обкладок обеих секций и к середине вторичной обкладки с диагональным подключением нагрузки. При параллельном соединении обкладок обеих секций МИЭК с диагональным подключением источника питания и нагрузки достигается максимальный коэффициент стабилизации по току нагрузки (рисунок 2.4, в).

Показанный на рисунке 2.4, б, ИЕП отличается от ИЕП, приведенного на рисунке 2.4, а, тем, что конец второй проводящей обкладки первой секции подключен к началу второй проводящей обкладки второй секции, что позволяет получить наилучшие стабилизирующие свойства среди двухсекционных схем МИЭК, так как осуществляет стабилизацию тока нагрузки в широком диапазоне изменения частоты (от $0,75 \cdot f_{рез.}$ до $1,35 \cdot f_{рез.}$).

Приведенный на рисунке 2.4, в, ИЕП отличается от ИЕП, показанного на рисунке 2.4, а, тем, что конец первой проводящей обкладки первой секции подключен к началу первой проводящей обкладки второй секции, что позволяет осуществлять стабилизацию тока нагрузки большей амплитуды ($i_{L3} = 1,23$), достичь наибольшего коэффициента усиления по напряжению ($k_{U3} = 75$).

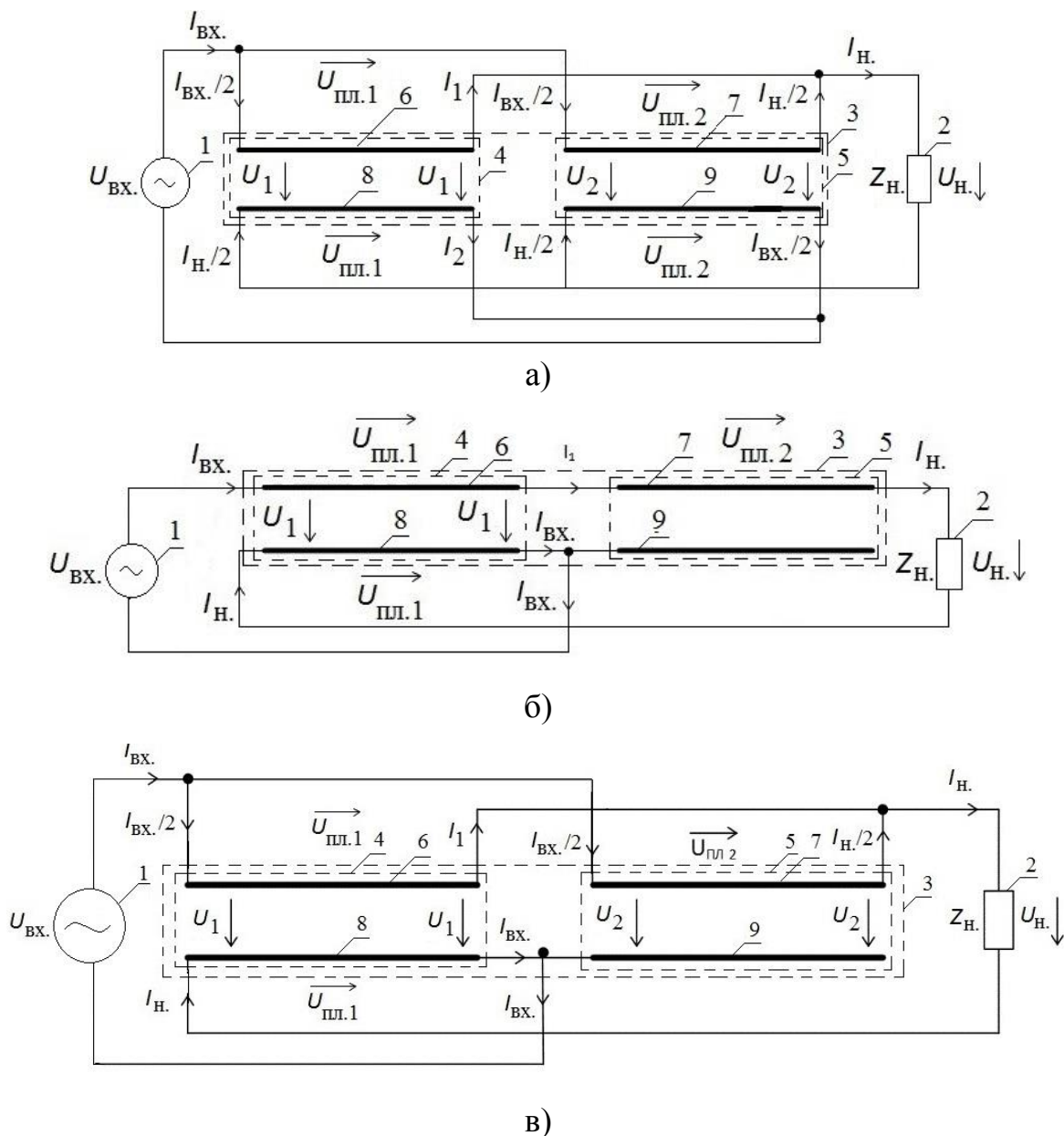


Рисунок 2.4 – Схема разработанного ИЕП на основе двухсекционной структуры МИЭК:

- 1 – источник питания; 2 – нагрузка; 3 – двухсекционный МИЭК;
4, 5 – первая и вторая секции; 6, 7 и 8, 9 – первые и вторые проводящие обкладки

Разработанный ИЕП позволяет расширить функциональные возможности устройства на базе МИЭК, состоящего из двух секций и реализующего схемотехнические решения с одинаковыми способами подключения источника питания и нагрузки, отличающиеся только способом соединения секций МИЭК. Предлагаемый ИЕП обладает возможностью подключения второй секции различными способами, что позволяет, не изменяя способа подключения источника питания и нагрузки, помимо схемотехнических решений, аналогичных прототипу (рисунки 2.4, б, в) реализовать схемотехническое решение (рисунок 2.4, а), занимающее промежуточное положение, по сравнению с прототипом [49].

Исследованная двухсекционная структура МИЭК позволяет реализовать множество комбинаций схемотехнических решений с разными стабилизирующими свойствами. Количество комбинаций схем ИЕП для ССТ на основе двухсекционной структуры МИЭК определяется количеством изменяемых параметров, а именно:

- вариантами соединения секций МИЭК: последовательное, параллельное и смешанное;
- схемой подключения источника питания к секциям МИЭК;
- способом подключения нагрузки.

В данной диссертационной работе рассматриваются два способа подключения источника питания к секциям МИЭК:

- подключение к началу первой проводящей обкладки первой секции и к концу второй проводящей обкладки первой секции («диагональное»);
- подключение к началу первой проводящей обкладки первой секции и к электрическому выводу между секциями МИЭК.

В работе рассматривается один способ подключения нагрузки – «диагональный» – к началу второй проводящей обкладки первой секции и к концу второй проводящей обкладки второй секции.

Общее число вариантов соединения секций МИЭК для двухсекционной структуры, определяемое количеством электрических выводов, составляет более 5000, из которых следует исключить схмотехнические исполнения с «закороченными» секциями. Также в работе не рассматриваются схемы с встречным включением проводящих обкладок секций. В результате для анализа определены 32 схемы ИЕП, показанные в приложении Б.

Для функционирования ССТ и стабилизации тока нагрузки в широком диапазоне изменения сопротивления нагрузки, частота коммутации полупроводниковых ключей инвертора с ИЕП, включенным в его диагональ, и значения индуктивности и емкости МИЭК должны быть подобраны таким образом, чтобы ССТ с ИЕП находилась в постоянном резонансе [6]. Максимальная ширина диапазона изменения частоты, в котором осуществляется стабилизация тока нагрузки с заданной точностью, может быть достигнута при диагональном подключении источника питания и нагрузки и последовательном соединении секций МИЭК с электрическим выводом в середине вторичной обкладки.

2.4 Технические решения электротехнических систем и устройств на основе индуктивно-емкостного преобразователя

2.4.1 Техническое решение системы заряда емкостных накопителей на основе индуктивно-емкостного преобразователя

В диссертационной работе исследуются системы заряда ЕН, где ИЕП работают как параметрические стабилизаторы тока. При проектировании систем заряда ЕН ИЕП выполняют функцию звена повышенной частоты. Применение ИЕП в системах заряда ЕН позволяет обеспечить рост напряжения на конденсаторе по линейному закону и повысить КПД процесса заряда.

Существуют различные схмотехнические решения систем заряда ЕН на дискретных компонентах: нерегулируемые преобразователи, к которым относятся

неуправляемые выпрямители и инверторы, преобразователи с дозаторами энергии, и регулируемые системы заряда ЕН с фазовым регулированием, к которым относятся тиристорные регуляторы переменного напряжения, полупроводниковые инверторы с ШИМ выходного напряжения [76, 77, 78, 79, 80]. Необходимость заряда ЕН до напряжения, значительно превышающего напряжение источника питания, предопределяет использование в высоковольтных системах заряда трансформаторов, которые характеризуются большой массой и крупными габаритами [81].

В [82] приведен сравнительный анализ систем заряда различных типов. Для уменьшения массы и габаритов систем заряда разработчики применяют в составе систем заряда полупроводниковые преобразователи, которые также увеличивают КПД и коэффициент использования источника [81]. Таким образом, системы заряда ЕН с ИЕП обладают рядом недостатков, среди которых большая масса и крупные габариты, обусловленные наличием большого количества дискретных компонентов в ИЕП – катушек индуктивности и конденсаторов.

Применение преобразователей повышенной частоты позволяет не только уменьшить массу и габариты систем заряда, но и с высокой точностью управлять процессом заряда ЕН. Наиболее оптимальное с энергетической точки зрения схемотехническое решение ИЕП для системы заряда ЕН определено по результатам аналитического обзора и патентного поиска, проведенных в главе 1. Данное техническое решение системы заряда ЕН предлагается усовершенствовать применением гибридного ЭМЭ – МИЭК – для построения на его основе ИЕП.

В данной диссертации разработано и запатентовано устройство заряда ЕН на основе МИЭК, которое может быть использовано в различных электрофизических устройствах, в которых используется накопление энергии в конденсаторах, в частности в генераторах мощных импульсов [82, 83].

Разработанная система заряда ЕН показана на рисунке 2.5. Многофункциональный интегрированный электромагнитный компонент состоит

из проводящих обкладок с выводами, расположенными в начале и в конце обкладок, подключенными в диагональ инвертора напряжения и к нагрузке [84].

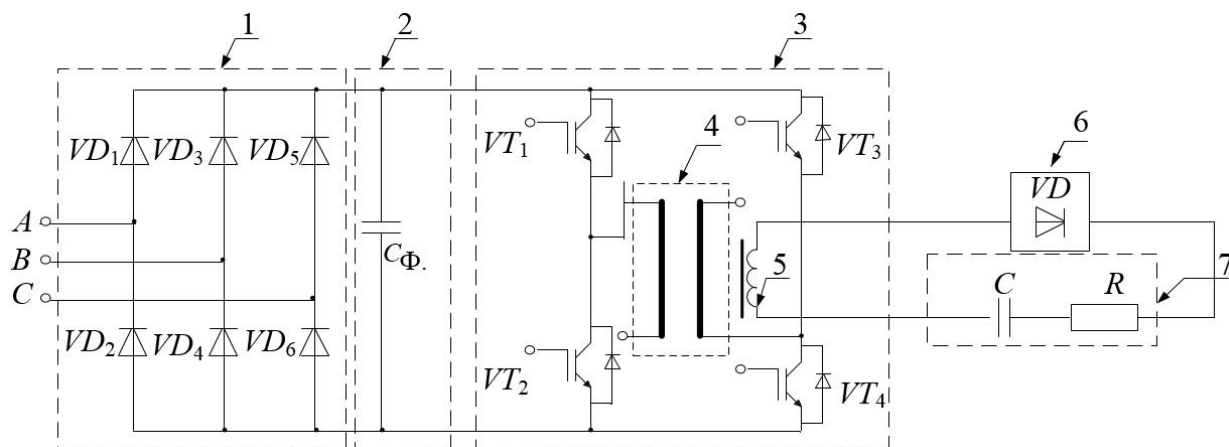


Рисунок 2.5 – Система заряда ЕН:

1 – выпрямитель; 2 – сглаживающий фильтр; 3 – автономный инвертор напряжения; 4 – МИЭК; 5 – трансформатор; 6 – высоковольтный столб; 7 – ЕН

Таким образом, применение методов функциональной интеграции ЭМЭ и повышение частоты преобразования позволило уменьшить массу и габариты системы заряда ЕН, обеспечить наиболее энергетически эффективный режим работы устройства с максимальным КПД.

2.4.2 Техническое решение индукционной нагревательной системы на основе индуктивно-емкостного преобразователя

Объекты нефтегазовой отрасли требуют обеспечения работы нагревательных систем: при добыче и транспортировке высоковязкой нефти требуется оказывать тепловое воздействие для снижения вязкости, облегчения процесса перекачки, снижения нагрузки на насосы и приводы. Наиболее эффективными и безопасными нагревательными системами в этом случае являются электротермические системы. К ним относятся кабельные (резистивные) системы, индукционно-резистивные системы СКИН-системы и индукционные нагревательные системы (ИНС), работающие на промышленной и среднеповышенной частотах [85, 86]. Преимуществами применения таких систем являются высокая энергетическая эффективность, возможность локализации

места нагрева, простота монтажа и эксплуатации. Применение ИНС, работающих на среднеповышенных частотах предпочтительнее, поскольку они имеют лучшую управляемость процессами передачи тепловой мощности, необходимую при различных условиях перекачки нефти по сравнению с системами, работающими на промышленной частоте.

Индукционные нагревательные системы представляют собой индуктор и источник со звеном повышенной частоты.

В диссертационной работе исследуются ИНС, где ИЕП работают как параметрические стабилизаторы тока и выполняют функцию звена повышенной частоты. Применение ИЕП в ИНС позволяет обеспечить снижение массы и габаритов и повышение энергетической эффективности. Применение МИЭК в качестве ИЕП, выполняющего роль звена повышенной частоты, проводящие обкладки которого используются как индуктор, позволяет упростить и повысить надежность монтажа, расширить функциональные возможности индукционной нагревательной системы (ИНС).

Существуют различные схемотехнические решения ИНС с ИЕП на дискретных компонентах [85, 87]. Индукционные нагревательные системы с ИЕП на дискретных ЭМЭ обладают рядом недостатков, среди которых высокие тепловые потери при транспортировке вязких текучих сред, низкая эффективность перелачи тепла трубопроводу, сложность монтажа, большая масса и крупные габариты, обусловленные наличием большого количества дискретных компонентов в ИЕП – катушек индуктивности и конденсаторов. Для устранения перечисленных выше недостатков предлагается использовать для построения индукционных нагревательных систем ИЕП, выполненные на гибридном ЭМЭ – МИЭК [88].

На рисунке 2.6 показана разработанная индукционная нагревательная система с ИЕП на основе МИЭК, содержащая источник питания, систему управления и нагревательные элементы [89, 90]. Нагревательные элементы

выполнены в виде МИЭК и размещены на трубопроводе с интервалами [57, 91]. Проводящие обкладки МИЭК выполняют роль индуктора.

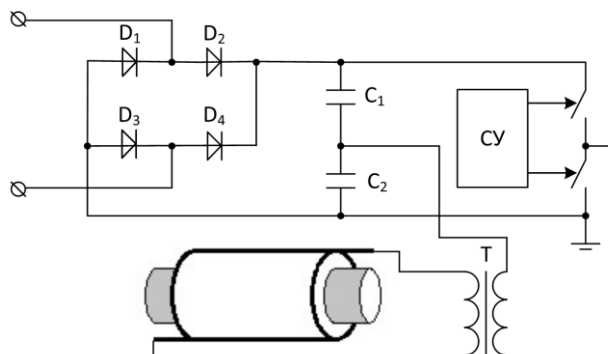


Рисунок 2.6 – Индукционная нагревательная система с ИЕП на основе МИЭК

Применение МИЭК позволяет снизить тепловые потери при транспортировке вязких текучих сред, повысить эффективность передачи тепла рабочей трубе, упростить и повысить надежность монтажа, расширить функциональные возможности при создании трубопроводов с различными температурными режимами перекачки вязких жидкостей.

Применение методов функциональной интеграции ЭМЭ для создания ИЕП и повышение частоты преобразования позволило уменьшить массу и габариты ИНС, обеспечить наиболее энергетически эффективный режим работы устройства с максимальным КПД [92, 93, 94, 95].

Выводы по главе 2

1. Разработано новое техническое решение ИЕП, позволяющее уменьшить массу и габариты устройства, повысить надежность за счет уменьшения числа элементов и их глубокой интеграции при обеспечении регулирования резонансной частоты устройства в широких пределах и возможности регулирования уровня выходного напряжения (патент РФ на изобретение № 2450413). В разработанном ИЕП реализовано снижение уровня резонансного

напряжения и тока, что позволяет предложенному ИЕП работать в режиме холостого хода.

2. Разработано и запатентовано новое техническое решение ИЕП, позволяющее расширить функциональные возможности устройства за счет использования двухсекционной структуры МИЭК, способной на основе одного компонента реализовать несколько схем ИЕП с разными параметрами стабилизации (патент РФ на изобретение № 2632412).

3. Разработано и запатентовано новое техническое решение устройства заряда ЕН, отличающееся от существующих использованием гибридного ЭМЭ, выполняющего функцию ИЕП, включенного в диагональ инвертора (патент РФ на полезную модель № 117748). Применение методов функциональной интеграции ЭМЭ и повышение частоты преобразования позволило уменьшить массу и габариты ССТ, обеспечить наиболее энергетически эффективный режим работы устройства с максимальным КПД.

4. Разработано и запатентовано новое техническое решение индукционной нагревательной системы с ИЕП на основе МИЭК, выполняющего функции нагревательного элемента и коммутационного контура (патенты РФ на изобретение № 2584137 и полезную модель № 164415). Применение в ИНС в качестве нагревательного элемента МИЭК, работающего в резонансном режиме и выполняющего роль звена повышенной частоты, позволяет снизить массу и габариты, упростить и повысить надежность монтажа, расширить функциональные возможности ИНС, повысить энергетическую эффективность процесса обеспечения температурных режимов при транспортировке вязких текучих сред.

ГЛАВА 3 МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНДУКТИВНО-ЕМКОСТНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ И СИСТЕМ СТАБИЛИЗАЦИИ ТОКА НА ИХ БАЗЕ

3.1 Разработка математических моделей и исследование частотных и энергетических характеристик индуктивно-емкостных преобразователей

3.1.1 Моделирование электрической схемы замещения многофункционального интегрированного электромагнитного компонента

Рассмотрим схему замещения МИЭК (рисунок 3.1), на которой МИЭК представлен в виде бесконечно большого числа n элементарных индуктивностей и емкостей. По методике анализа систем с распределенными параметрами выделим бесконечно малый отрезок длины обкладок dx на расстоянии x от их начала. Обозначим погонные (на единицу длины обкладок) емкость и индуктивность C_0 и L_0 соответственно. Величины элементарной индуктивности каждой обкладки на выделенном элементе – $L_0 \cdot dx$, элементарной емкости – $C_0 \cdot dx$.

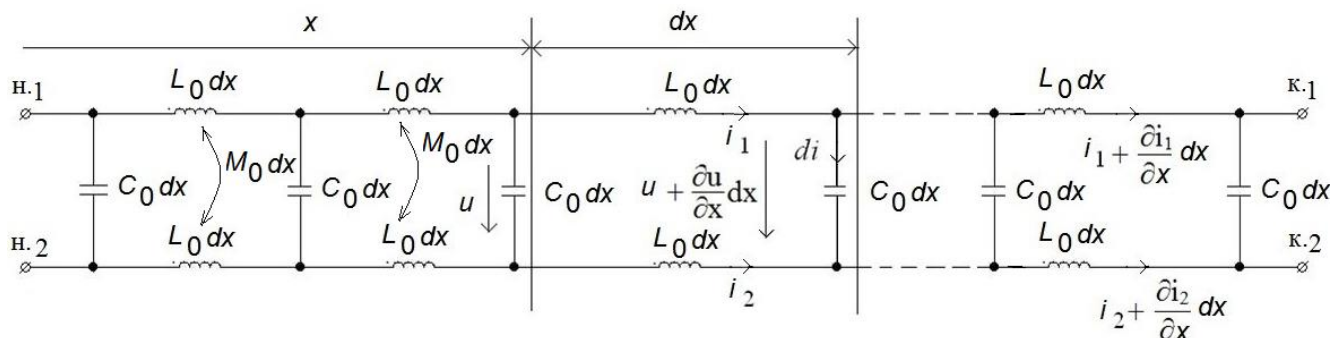


Рисунок 3.1 – Схема замещения МИЭК с распределенными параметрами

Анализ будем вести при следующих допущениях:

- токи утечки между обкладками отсутствуют;
- все элементарные индуктивности (в том числе и расположенные на одной обкладке) имеют полную магнитную связь.

Уравнения по второму закону Кирхгофа для выделенного элемента dx , направления токов в элементарных индуктивностях показано на рисунке 3.1:

$$-u + L_0 \cdot dx \cdot \frac{\partial i_1}{\partial t} + \sum_{m=1}^n M_0 \cdot dx \cdot \frac{\partial i_{1m}}{\partial t} - M_0 \cdot dx \cdot \frac{\partial i_2}{\partial t} - \sum_{m=1}^n M_0 \cdot dx \cdot \frac{\partial i_{2m}}{\partial t} + R \cdot dx \cdot \frac{\partial i_1}{\partial t} +$$

$$+ u + \frac{\partial u}{\partial t} \cdot dx - R \cdot dx \cdot \frac{\partial i_2}{\partial t} + L_0 \cdot dx \cdot \frac{\partial i_2}{\partial t} - M_0 \cdot dx \cdot \frac{\partial i_1}{\partial t} + \sum_{m=1}^n M_0 \cdot dx \cdot \frac{\partial i_{2m}}{\partial t} - \sum_{m=1}^n M_0 \cdot dx \cdot \frac{\partial i_{1m}}{\partial t} = 0,$$

где u – напряжение между обкладками на входе элемента dx ;

M_0 – взаимная индуктивность двух элементарных индуктивностей;

i_{1m} – ток в любой m -й индуктивности первой обкладки;

i_{2m} – ток в любой m -й индуктивности второй обкладки.

Учитывая, что все элементарные индуктивности одинаковы ($L_0 = M_0$), выполнив преобразования, получим, что напряжение между проводящими обкладками постоянно по всей длине

$$\frac{\partial u}{\partial x} = 0 \text{ или } u(x) = \text{const},$$

$$u = \frac{1}{C} \cdot \int (i_{n,1} - i_{k,1}) \cdot dt,$$

где $u(x)$ – напряжение между точками двух обкладок, равноудаленных от их начала.

Ток через элементарную емкость $C_0 \cdot dx$ не зависит от удаления от начал обкладок (не зависит от координаты x) и равен

$$di = C_0 \cdot dx \cdot \frac{\partial u}{\partial t}.$$

По первому закону Кирхгофа в выделенном элементе dx для первой обкладки

$$i_1 = di + i_{1m} + \frac{\partial i_1}{\partial x} \cdot dx,$$

$$di = -\frac{\partial i_1}{\partial x} \cdot dx,$$

для второй обкладки

$$i_2 + di = i_2 + \frac{\partial i_2}{\partial x} \cdot dx,$$

$$di = \frac{\partial i_2}{\partial x} \cdot dx.$$

Формулы для токов обкладок примут вид:

$$i_1(x) = -C_0 \cdot x \cdot \frac{\partial u}{\partial t} + i_{н.1},$$

$$i_2(x) = -C_0 \cdot x \cdot \frac{\partial u}{\partial t} + i_{н.2},$$

$$i_1(l) = -C_0 \cdot l \cdot \frac{\partial u}{\partial t} + i_{н.1},$$

где $i_1(l)$ – ток в конце первой обкладки.

$$i_1(l) = i_{к.1}.$$

Значение напряжения между обкладками определяется из формулы для x равного 1

$$u = \frac{1}{C} \cdot \int (i_{н.1} - i_{к.1}) \cdot dt.$$

Аналогично из формулы:

$$u = \frac{1}{C} \cdot \int (i_{к.2} - i_{н.2}) \cdot dt.$$

Зная распределение и значение тока обкладок, можно вычислить напряжение на них. Напряжение, наводимое на элементарной индуктивности обкладок, определяется как:

$$du_{нл.} = L_0 \cdot dx \cdot \frac{\partial i_1}{\partial t} + \sum_{m=1}^n M_0 \cdot dx \cdot \frac{\partial i_{1m.}}{\partial t} \pm M_0 \cdot dx \cdot \frac{\partial i_2}{\partial t} \pm \sum_{m=1}^n M_0 \cdot dx \cdot \frac{\partial i_{2m.}}{\partial t}.$$

Подставим значения токов $i_1(x)$ и $i_2(x)$ из формул:

$$du_{нл.} = L_0 \cdot l \cdot \frac{d(i_{н.1} \pm i_{н.2})}{dt}.$$

Система уравнений, описывающая процессы в односекционном МИЭК:

$$\begin{cases} i_{\Sigma} = i_{H.1} + i_{H.2} = i_{K.1} + i_{K.2}, \\ u = \frac{1}{C} \cdot \int (i_{H.1} - i_{K.1}) \cdot dt, \\ u_{Пл.} = L \cdot \frac{d(i_{H.1} + i_{H.2})}{dt}, \\ i_{cp.} = \frac{(i_1 + i_H)}{2}, \\ E = -2 \cdot L \cdot \frac{di_{cp.}}{dt}, \\ u_C = u_1 + E, \\ u_{H.} = u_C + E = R_{H.} \cdot i_{H.}, \\ i_C = i_1 - i_{H.} = C \cdot \frac{du_C}{dt}. \end{cases}$$

Совместное решение этих уравнений относительно u_H и u_1 приводит к дифференциальному уравнению

$$L \cdot C \cdot \frac{d^2 u_{H.}}{dt^2} + 4 \cdot \frac{L}{R_{H.}} \cdot \frac{du_{H.}}{dt} + u_{H.} = -L \cdot C \cdot \frac{d^2 u_1}{dt^2} + u_1.$$

Полагая u_H и u_1 гармоническими, находим

$$-L \cdot C \cdot \omega^2 \cdot U_{H.} + 4 \cdot j \cdot \omega \cdot \frac{L}{R_{H.}} \cdot U_{H.} + U_{H.} = L \cdot C \cdot \omega^2 \cdot U_1 + U_1.$$

В [96] изучен односекционный МИЭК с использованием методики, состоящей в замене системы с распределенными параметрами системой с интегральными параметрами (рисунок 3.2).

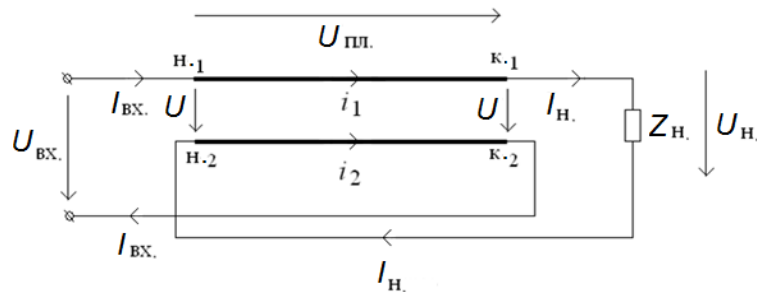


Рисунок 3.2 – Схема замещения МИЭК с интегральными параметрами

Система уравнений, описывающая ЭМП в односекционном МИЭК, для схемы замещения с интегральными параметрами (рисунок 3.2):

$$\begin{cases} \underline{U}_{\text{вх.}} = \underline{U}_{\text{пл.}} + \underline{U}, \\ \underline{U} = \frac{\underline{I}_{\text{вх.}} - \underline{I}_{\text{н.}}}{j \cdot \omega \cdot C}, \\ \underline{U}_{\text{пл.}} = j \cdot \omega \cdot (L \pm M) \cdot (\underline{I}_{\text{вх.}} + \underline{I}_{\text{н.}}), \\ \underline{U}_{\text{н.}} + \underline{U}_{\text{пл.}} = \underline{U}. \end{cases}$$

Соотношения, связывающие параметры МИЭК:

– алгебраическая сумма токов обкладок неизменна по их длине:

$$i_{\Sigma}(x) = \text{const}, i_{\Sigma} = i_{\text{н1}} \pm i_{\text{н2}} = i_{\text{к1}} \pm i_{\text{к2}}.$$

– напряжение между проводящими обкладками постоянно по всей длине:

$$u(x) = \text{const}, u = \frac{1}{C} \cdot \int (i_{\text{н.1}} - i_{\text{к.1}}) \cdot dt,$$

– напряжение между электрическими выводами одной проводящей обкладки:

$$u_{\text{пл.}} = (L \pm M) \cdot \frac{d(i_{\text{н.1}} + i_{\text{н.2}})}{dt}.$$

Применение данного метода позволяет упростить расчет сложных схем МИЭК (двух-, трехсекционных, трехобкладочных).

Для повышения адекватности математических моделей и точности расчетов частотных характеристик ИЕП на основе МИЭК с использованием интегральных параметров МИЭК разработана уточненная схема замещения МИЭК, учитывающая активные сопротивления обкладок, коэффициент магнитной связи между элементарными индуктивностями схемы замещения МИЭК (рисунок 3.3).

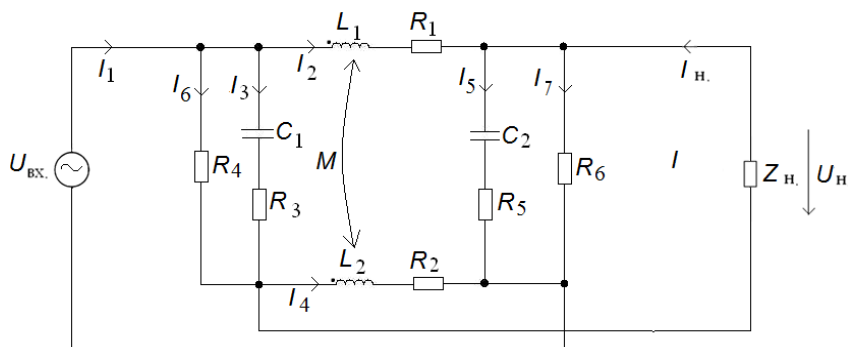


Рисунок 3.3 – Уточненная схема замещения МИЭК

Система уравнений, описывающая процессы в односекционном МИЭК с использованием интегральных параметров, для уточненной схемы замещения имеет вид:

$$\begin{cases} \underline{U}_{\text{ВХ.}} = \underline{U}_{\text{ПЛ.}} + \underline{U}, \\ \underline{U} = \frac{\underline{I}_{\text{ВХ.}} - \underline{I}_{\text{Н.}}}{j \cdot \omega \cdot C}, \\ \underline{U}_{\text{ПЛ.}} = (R + j \cdot \omega \cdot (L \pm M)) \cdot (\underline{I}_{\text{ВХ.}} + \underline{I}_{\text{Н.}}), \\ \underline{U}_{\text{Н.}} + \underline{U}_{\text{ПЛ.}} = \underline{U}. \end{cases}$$

Для исследования ЭМП, происходящих в ИЕП на основе МИЭК, показанном на рисунке 3.3, разработана компьютерная модель ССТ (источника тока) на базе ИЕП на основе МИЭК в среде *Simulink* пакета *MatLab* (рисунок 3.4). Разработанная модель позволяет определить токи и напряжения, действующие в элементах схемы, произвести выбор параметров преобразователя, которые при известных вариациях нагрузки обеспечивали бы заданную точность стабилизации тока нагрузки, дать рекомендации по расчету схемы.

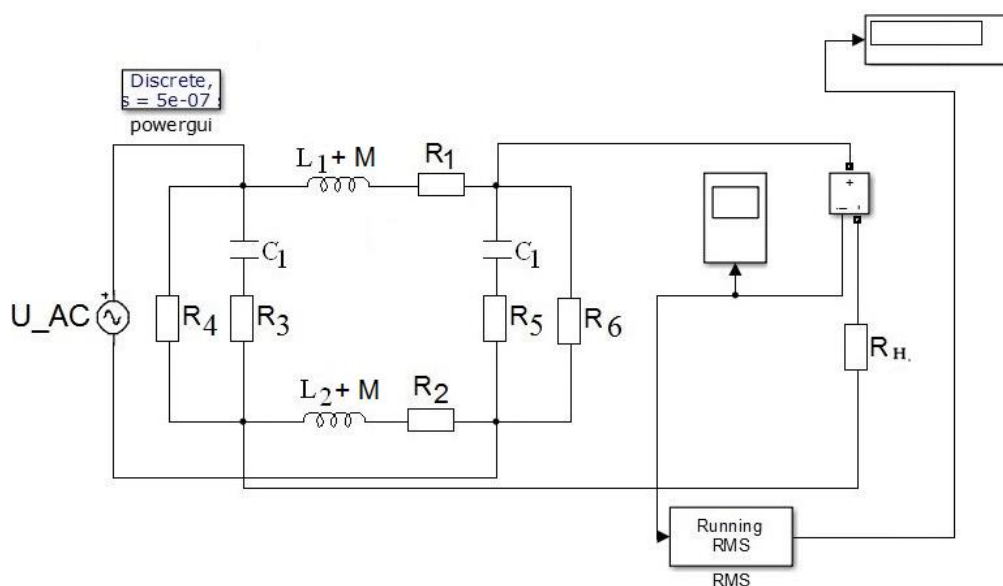


Рисунок 3.4 – Компьютерная модель источника тока на базе ИЕП на основе МИЭК в среде *Simulink* пакета *MatLab*

В результате моделирования получены графики напряжения питания, напряжения на проводящей обкладке и на емкости МИЭК, представленные на рисунке 3.5. На первом графике приведено напряжение источника питания, на

втором и третьем графиках – напряжения на проводящей обкладке и емкости МИЭК, которые находятся в противофазе и равны. Значения напряжений демонстрируют резонансный режим работы ИЕП с добротностью, равной 13 (рисунок 3.5).

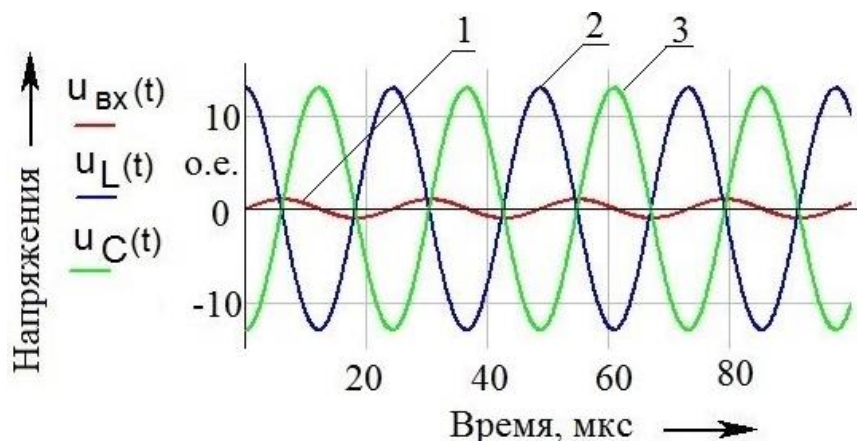


Рисунок 3.5 – Напряжение питания, напряжение на обкладке и напряжение на емкости МИЭК:

1 – напряжение питания; 2 – напряжение на обкладке; 3 – напряжение на емкости

Получено, что при использовании уточненной схемы замещения МИЭК математические соотношения, связывающие интегральные параметры МИЭК, справедливы для анализа электрических схем с МИЭК [45]. Следовательно, возможно получить частотные характеристики для различных структур МИЭК, описывая их с помощью интегральных параметров, что значительно ускорит процесс расчетов и приведет к использованию простого математического аппарата. Для того, чтобы подтвердить данное заключение, построим частотные характеристики односекционного МИЭК с использованием трех методов расчета, описанных в пункте 1.4 главы 1.

Компьютерная модель, в отличие от математической модели, позволяет проще исследовать работу данных схем при нелинейности сопротивления нагрузки.

3.1.2 Исследование энергетических и частотных характеристик односекционной структуры многофункционального интегрированного электромагнитного компонента

Выполним расчет частотных и энергетических характеристик односекционного МИЭК тремя методами анализа работы МИЭК в электрических схемах ИЕП, описанными в пункте 1.4 главы 1 [57, 83]. Результаты расчета тремя методами с использованием программы *MathCad* 15 параметров усиления и частотных характеристик односекционного МИЭК для различных значений добротности ($Q = 0,1; 0,316; 1; 3,16; 10$) приведены на рисунках с 3.6 по 3.9.

Наибольшее значение коэффициента усиления по напряжению и коэффициента стабилизации тока нагрузки достигается при значении добротности $Q = 10$ (рисунок 3.6, а). Из рисунка 3.8, а, видно, что для любых значений добротности (в данном случае Q от 0,1 до 10) односекционный МИЭК обладает резонансными свойствами с одним и тем же значением амплитуды передаточного сопротивления на частоте ω_0 .

Для любых значений добротности (в данном случае Q от 0,1 до 10) фазы коэффициента усиления по напряжению, входного сопротивления, передаточного сопротивления, передаточной проводимости изменяются в пределах от $-\pi/2$ до $\pi/2$ (рисунки 3.6, б, 3.7, б, 3.8, б, 3.9, б).

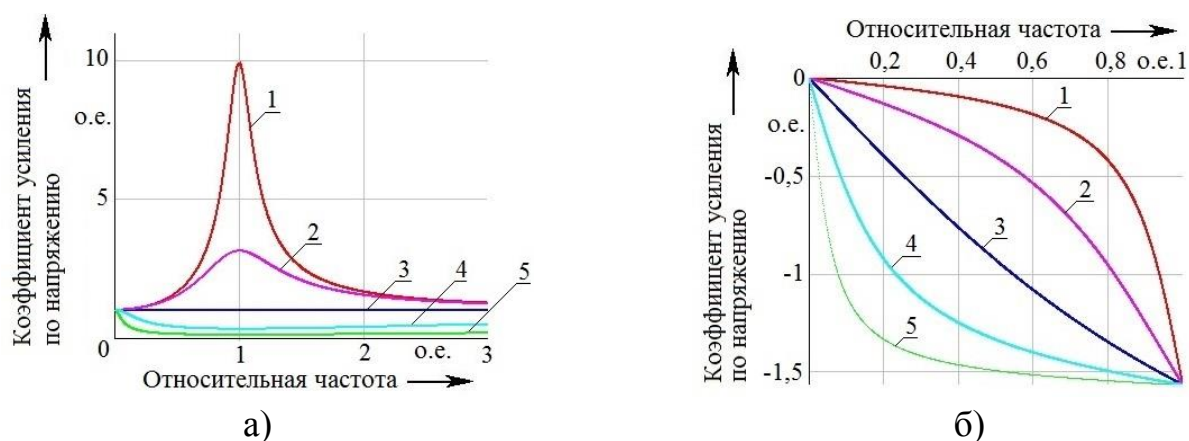


Рисунок 3.6 – Зависимости коэффициента усиления по напряжению односекционной структуры МИЭК $k_u = \underline{U}_н / \underline{U}_{вх.}$ от частоты (в о.е.):

а – АЧХ; б – ФЧХ

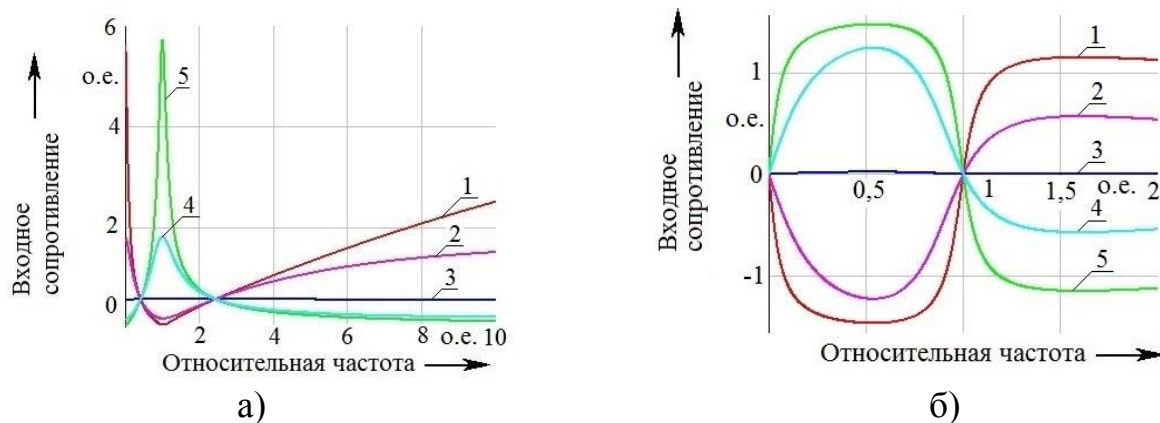


Рисунок 3.7 – Зависимости входного сопротивления односекционной структуры МИЭК $\underline{Z}_{\text{вх.}} = \underline{U}_{\text{вх.}}/\underline{I}_{\text{вх.}}$ от частоты (в о.е.):

а – АЧХ; б – ФЧХ

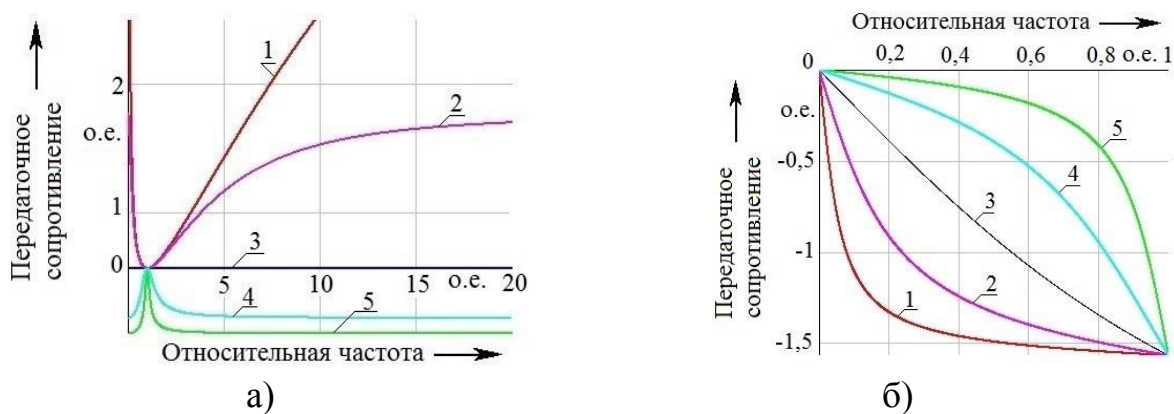


Рисунок 3.8 – Зависимости передаточного сопротивления односекционной структуры МИЭК $\underline{Z}_{\text{п.}} = \underline{U}_{\text{н.}}/\underline{I}_{\text{вх.}}$ от частоты (в о.е.):

а – АЧХ; б – ФЧХ

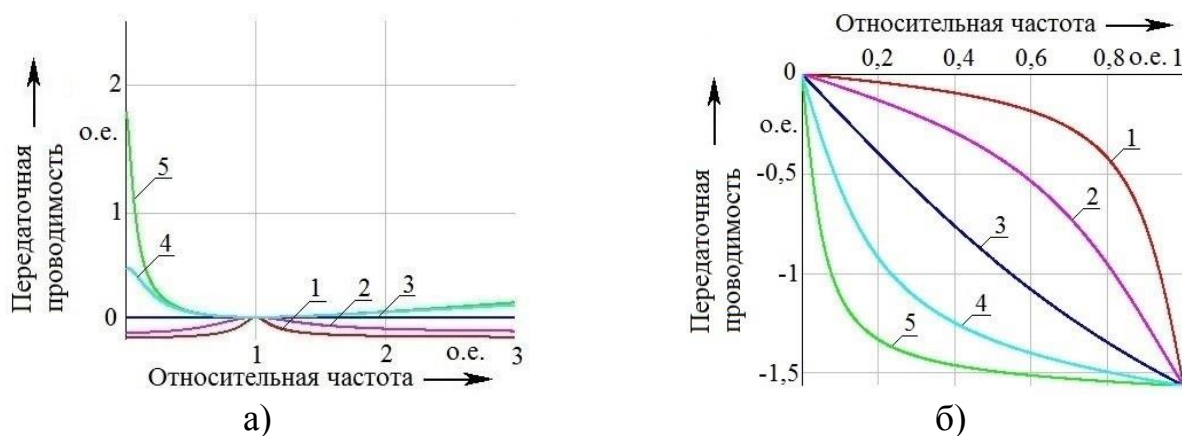


Рисунок 3.9 – Зависимости передаточной проводимости односекционной структуры МИЭК $\underline{Y}_{\text{п.}} = \underline{I}_{\text{н.}}/\underline{U}_{\text{вх.}}$ от частоты (в о.е.):

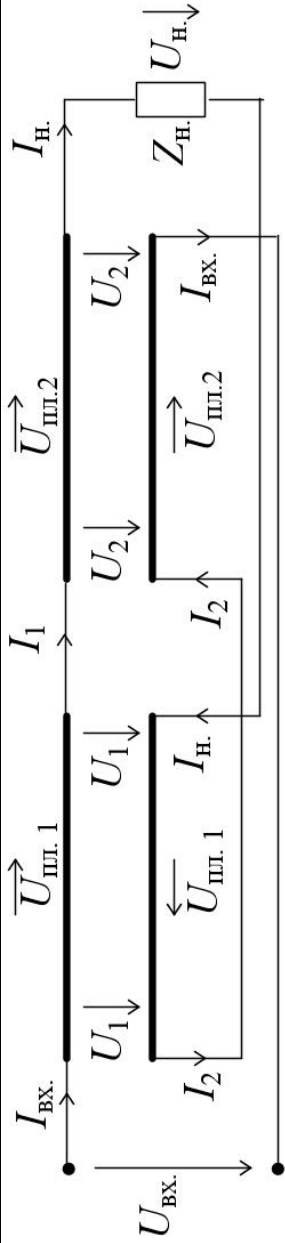
а – АЧХ; б – ФЧХ

Таким образом, при рассмотрении самой простой структуры МИЭК все сравниваемые методы расчета приводят к одинаковым результатам. Исследование энергетических и частотных характеристик двухсекционной структуры МИЭК будем проводить, используя описание ЭМП в ИЕП на основе МИЭК с помощью интегральных параметров МИЭК при значении добротности $Q = 10$.

3.1.3 Исследование энергетических и частотных характеристик двухсекционной структуры многофункционального интегрированного электромагнитного компонента

Разработанная в главе 2 и исследуемая в данной диссертации двухсекционная структура МИЭК позволяет реализовать более 30 комбинаций пригодных для создания ССТ схемотехнических решений ИЕП без изменения состава и количества элементов, входящих в схему ИЕП, с различными параметрами стабилизации и усиления (приложение Б). Из общего количества схем для более подробного исследования стабилизационных свойств, параметров усиления и частотных характеристик выбраны 5 схем ИЕП, представленных в таблице 3.1, отличающихся величинами коэффициента усиления по напряжению, коэффициента стабилизации тока нагрузки, коэффициента отклонения действующего значения тока нагрузки, вариантами соединения секций МИЭК и способами подключения источника питания и нагрузки. Схема № 1 (пункт 1 таблицы 3.1) анализируется для сравнения с односекционной структурой МИЭК. Схема № 2 характеризуется смешанным соединением секций МИЭК. Схема № 3 представляет интерес с точки зрения изучения влияния схемы подключения источника питания и нагрузки на стабилизационные свойства и частотные характеристики ИЕП. Схема № 4 обладает высоким коэффициентом усиления по напряжению. Схема № 5 характеризуется наилучшими стабилизирующими свойствами по току нагрузки.

Двухсекционный МИЭК с последовательным соединением первичных обкладок и параллельным соединением вторичных обкладок обеих секций и диагональным подключением источника питания и нагрузки



$$\underline{U}_{\text{BX}} = \underline{U}_{\text{пл.1}} + \underline{U}_{\text{пл.2}} + \underline{U}_2,$$

$$\underline{U}_1 = \frac{\underline{I}_{\text{BX}} - \underline{I}_1}{j \cdot \omega \cdot C_1},$$

$$\underline{U}_2 = \frac{\underline{I}_1 - \underline{I}_{\text{H.}}}{j \cdot \omega \cdot C_2},$$

$$\underline{U}_{\text{пл.1}} = (R_1 + j \cdot \omega \cdot (L_1 - M)) \cdot (\underline{I}_{\text{BX}} - \underline{I}_2),$$

$$\underline{U}_{\text{пл.2}} = (R_2 + j \cdot \omega \cdot (L_2 + M)) \cdot (\underline{I}_1 + \underline{I}_2),$$

$$\underline{U}_1 = \underline{U}_{\text{пл.1}} + \underline{U}_{\text{пл.2}} + \underline{U}_{\text{H.}} + \underline{U}_{\text{пл.1}},$$

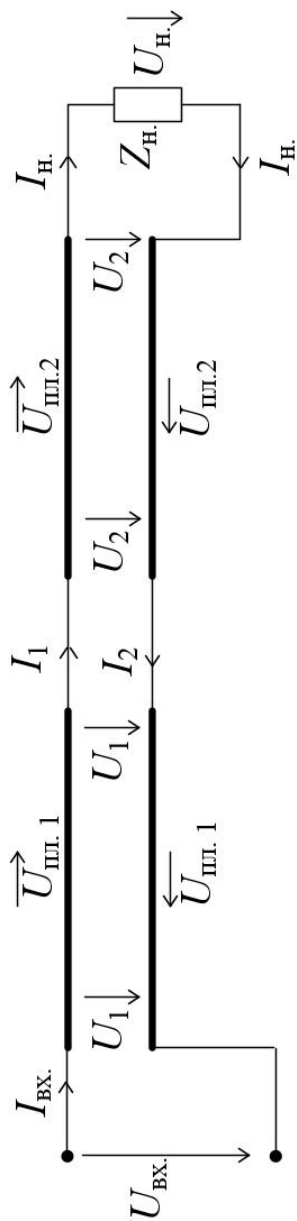
$$\underline{I}_1 = \frac{\underline{I}_{\text{BX}} + \underline{I}_{\text{H.}}}{2},$$

$$\underline{I}_2 = \frac{\underline{I}_{\text{BX}} + \underline{I}_{\text{H.}}}{2},$$

$$\underline{I}_{\text{H.}} = \frac{\omega \cdot C \cdot \underline{U}_{\text{BX}}}{2 \cdot j},$$

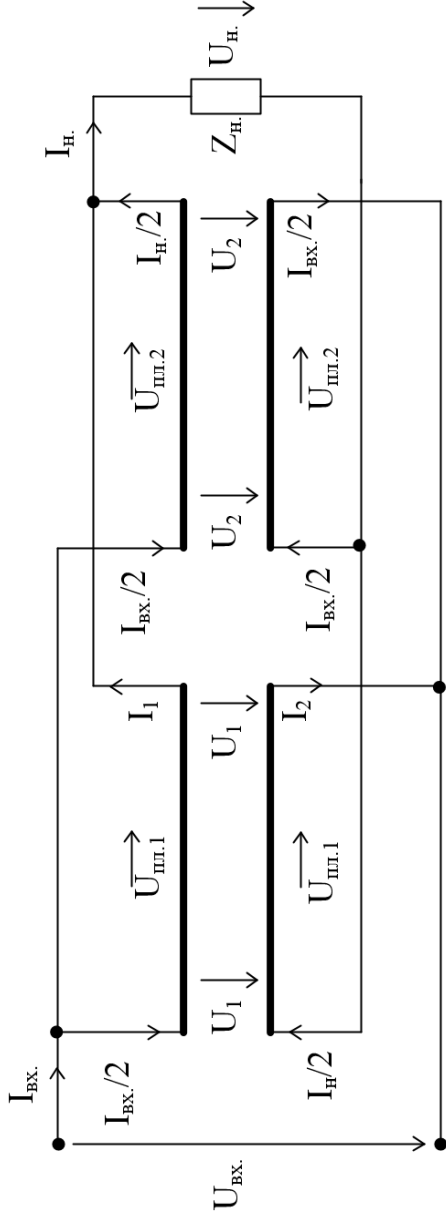
$$\underline{I}_{\text{H.}} = \frac{\underline{U}_{\text{BX}}}{2 \cdot (R + j \cdot \omega \cdot L)}.$$

Двухсекционный МИЭК с последовательным соединением секций и подключением источника питания к началу обкладок первой секции, нагрузки к концам обкладок второй секции



$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_{\text{BX.}} &= \underline{U}_{\text{IJI.1}} + \underline{U}_{\text{IJI.2}} + \underline{U}_2, \\ \underline{U}_1 &= \frac{\underline{I}_{\text{BX.}} - \underline{I}_1}{j \cdot \omega \cdot C_1}, \\ \underline{U}_2 &= \frac{\underline{I}_1 - \underline{I}_{\text{H.}}}{j \cdot \omega \cdot C_2}, \\ \underline{U}_{\text{IJI.1}} &= 0, \\ \underline{U}_{\text{IJI.2}} &= (R_2 + j \cdot \omega \cdot (L_2 - M)) \cdot (\underline{I}_1 - \underline{I}_2), \\ \underline{U}_1 &= \underline{U}_{\text{IJI.1}} + \underline{U}_{\text{IJI.2}} + \underline{U}_{\text{H.}} + \underline{U}_{\text{IJI.1}}, \\ \underline{I}_{\text{I.}} &= \frac{\underline{I}_{\text{BX.}} + \underline{I}_{\text{H.}}}{2}, \\ \underline{I}_2 &= \frac{\underline{I}_{\text{BX.}} + \underline{I}_{\text{H.}}}{2}, \\ \underline{I}_{\text{H.}} &= \frac{\omega \cdot C \cdot \underline{U}_{\text{BX.}}}{2 \cdot j}, \\ \underline{I}_{\text{H.}} &= \frac{\underline{U}_{\text{BX.}}}{2 \cdot (R + j \cdot \omega \cdot (L - M))}. \end{aligned} \right\}$$

Двухсекционный МИЭК с параллельным соединением секций и диагональным подключением источника питания и нагрузки



$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_{\text{ВХ.}} &= \underline{U}_{\text{пл.1}} + \underline{U}_2, \\ \underline{U}_1 &= \frac{\underline{I}_{\text{ВХ.}} - \underline{I}_1}{j \cdot \omega \cdot C_1}, \\ \underline{U}_2 &= \frac{\underline{I}_{\text{ВХ.}} - \underline{I}_1}{2 \cdot j \cdot \omega \cdot C_2}, \\ \underline{U}_{\text{пл.1}} &= (R_1 + j \cdot \omega \cdot (L_1 + M)) \cdot \left(\frac{\underline{I}_{\text{ВХ.}} + \underline{I}_1}{2} \right), \\ \underline{U}_{\text{пл.2}} &= (R_2 + j \cdot \omega \cdot (L_2 + M)) \cdot \left(\frac{\underline{I}_{\text{ВХ.}} + \underline{I}_1}{2} \right), \\ \underline{U}_1 &= \underline{U}_{\text{пл.1}} + \underline{U}_{\text{Н.}}, \\ \underline{I}_1 &= \frac{\underline{I}_{\text{ВХ.}}}{2}, \\ \underline{I}_2 &= \frac{\underline{I}_{\text{ВХ.}}}{2}, \\ \underline{I}_{\text{Н.}} &= \frac{\omega \cdot C \cdot \underline{U}_{\text{ВХ.}}}{2 \cdot j}, \\ \underline{I}_{\text{Н.}} &= \frac{\underline{U}_{\text{ВХ.}}}{2 \cdot (R + j \cdot \omega \cdot (L + 2 \cdot M))}. \end{aligned} \right\}$$

5	Двухсекционный МИЭК с последовательным соединением секций и диагональным подключением источника питания и нагрузки с выводом в середине вторичной обкладки $\begin{cases} \underline{U}_{\text{BX.}} = \underline{U}_{\text{пл.1}} + \underline{U}_1, \\ \underline{U}_1 = \frac{\underline{I} - \underline{I}_1}{j \cdot \omega \cdot C_1}, \\ \underline{U}_2 = \frac{\underline{I} - \underline{I}_H}{j \cdot \omega \cdot C_2}, \\ \underline{U}_{\text{пл.1}} = (R_1 + j \cdot \omega \cdot (L_1 + M)) \cdot (\underline{I}_{\text{BX.}} + \underline{I}_H), \\ \underline{U}_1 = \underline{U}_{\text{пл.1}} + \underline{U}_{\text{пл.2}} + \underline{U}_H, \\ \underline{I}_1 = \underline{I}_H, \\ \underline{I}_H = \frac{\omega \cdot C \cdot \underline{U}_{\text{BX.}}}{2 \cdot j}, \\ \underline{I}_{\text{H.}} = \frac{\underline{U}_{\text{BX.}}}{2 \cdot (R + j \cdot \omega \cdot (L + M))}. \end{cases}$
---	--

Выполнено математическое моделирование ИЕП на основе МИЭК различного схемотехнического исполнения в пакете прикладных программ *MathCad*. Новизна разработанных математических моделей заключается в использовании уточненной схемы замещения МИЭК на дискретных ЭМЭ, учитывающей активное сопротивление и магнитную связь проводящих обкладок МИЭК. Разработанные математические модели зарегистрированы в качестве программы для ЭВМ которая позволяет с допустимой точностью рассчитать энергетические и частотные характеристики базовых структур МИЭК, учитывая эквивалентность схемы замещения МИЭК на дискретных ЭМЭ интегрированной структуре с точки зрения происходящих в МИЭК ЭМП [97, 98, 99]. Предложенная программа для ЭВМ для построения частотных характеристик МИЭК и расчета коэффициента стабилизации тока нагрузки ИЕП, выполненного на его основе, позволяет определить ширину диапазона изменения частоты в зависимости заданной точности стабилизации тока нагрузки [56, 62].

В данной диссертации приведены результаты расчета ЭМП в ИЕП на основе МИЭК с использованием системы линейных алгебраических уравнений, составленных на основе интегральных параметров, в программе *MathCad 15*, получены частотные характеристики МИЭК различного схемотехнического исполнения, показанных в таблице 3.1 (рисунки с 3.10 по 3.14) [58].

Двухсекционный МИЭК характеризуется максимальным значением амплитуды коэффициента усиления по напряжению (относительное значение 20 при добротности $Q = 10$) (рисунок 3.10, а) при работе в резонансном режиме, диагональном подключении источника питания и нагрузки и параллельном соединении секций, что позволяет использовать его в генераторах импульсов напряжений, устройствах для испытания изоляции повышенным напряжением [67, 84].

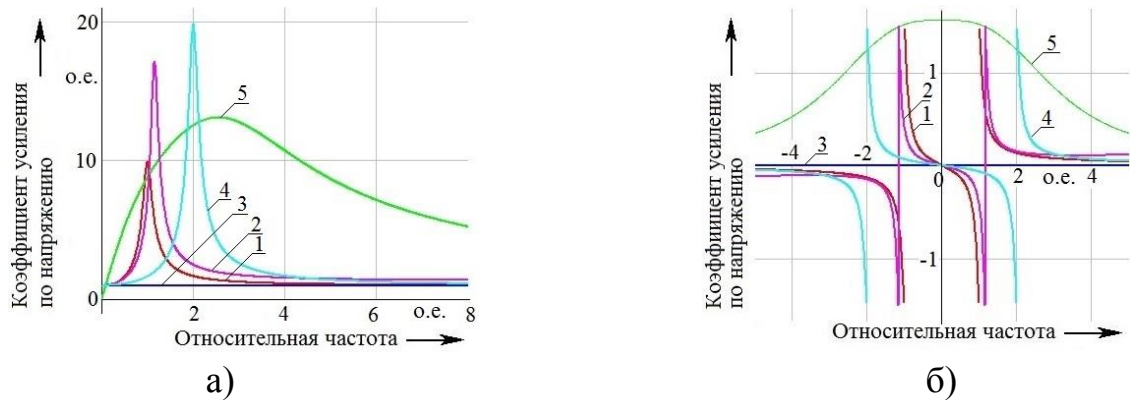


Рисунок 3.10 – Зависимости коэффициента усиления по напряжению двухсекционной структуры МИЭК $k_u = \underline{U}_n / \underline{U}_{вх.}$ от частоты (в о.е.):
а – АЧХ; б – ФЧХ

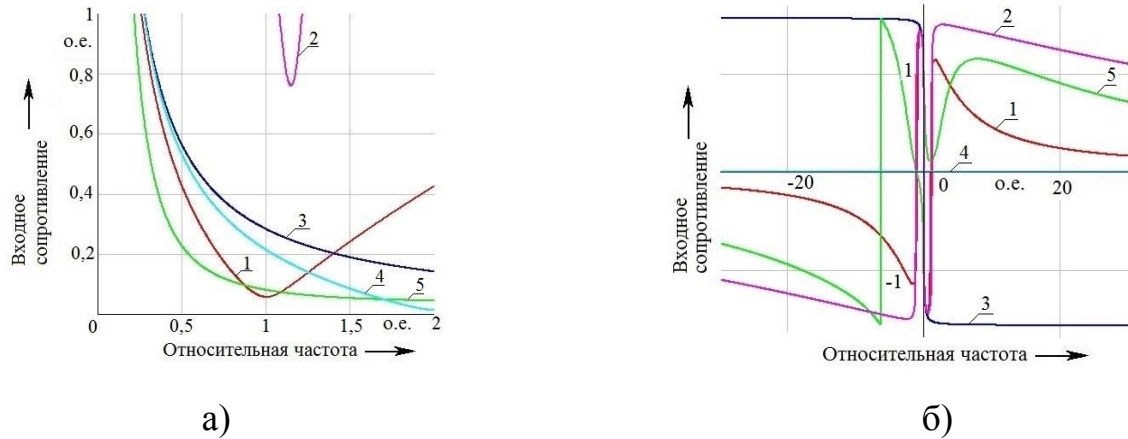


Рисунок 3.11 – Зависимости входного сопротивления двухсекционной структуры МИЭК $\underline{Z}_{вх.} = \underline{U}_{вх.} / \underline{I}_{вх.}$ от частоты (в о.е.):
а – АЧХ; б – ФЧХ

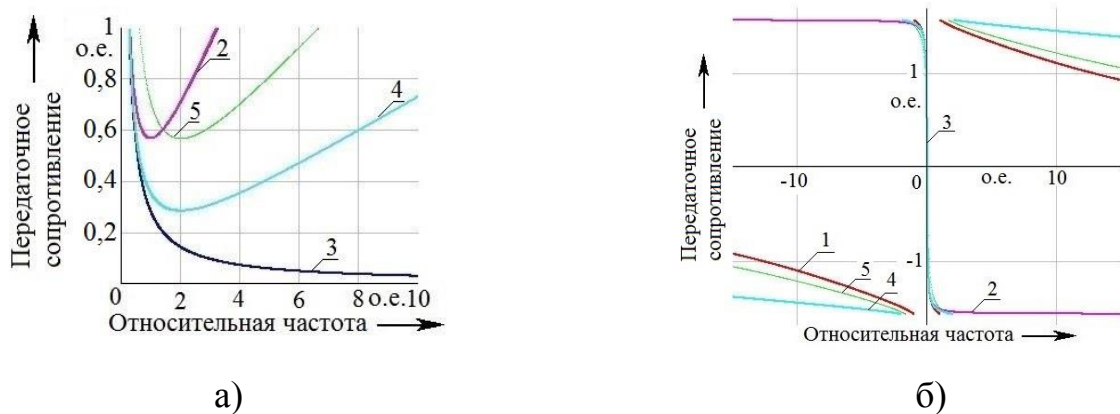


Рисунок 3.12 – Зависимости передаточного сопротивления двухсекционной структуры МИЭК $\underline{Z}_п. = \underline{U}_n / \underline{I}_{вх.}$ от частоты (в о.е.):
а – АЧХ; б – ФЧХ

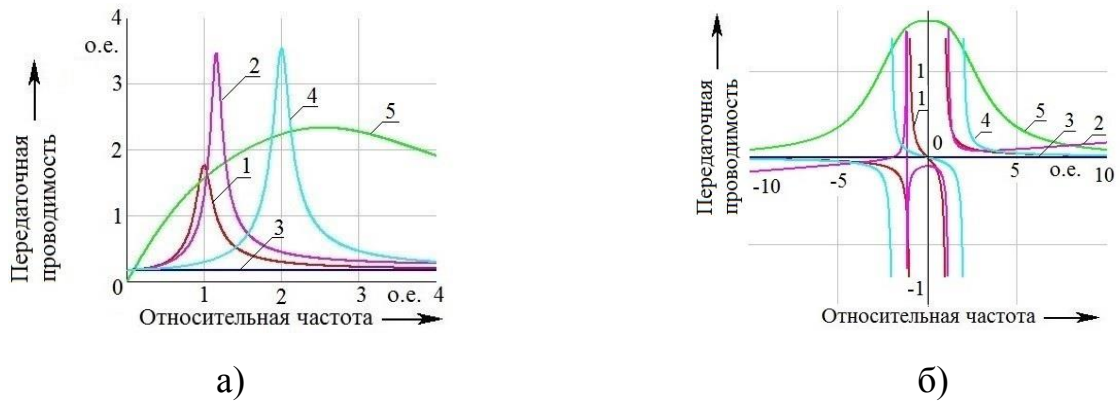


Рисунок 3.13 – Зависимости передаточной проводимости $\underline{Y}_{п.} = \underline{I}_н / \underline{U}_{вх.}$ двухсекционной структуры МИЭК от частоты (в о.е.):
а – АЧХ; б – ФЧХ

Входное и передаточное сопротивления снижаются с увеличением частоты для режимов работы, близких к коротким замыканиям. Из графиков (рисунки 3.11, а, и 3.12, а) видно, что обязательное условие работы ИЕП [2, 21] в режиме короткого замыкания – снижение входного и передаточного сопротивлений с увеличением частоты – выполняется для различных схематических исполнений двухсекционной структуры МИЭК. Передаточная проводимость двухсекционной структуры МИЭК возрастает с увеличением частоты (рисунок 3.13, а).

Анализ частотных характеристик двухсекционной структуры МИЭК с точки зрения эффективности применения данных структуры в различных электротехнических устройствах позволяет сказать, что из рассмотренных схем ИЕП наиболее пригодными при работе от источника питания с высшими гармониками является схематическое исполнение двухсекционного МИЭК с последовательным соединением секций и диагональным подключением источника питания и нагрузки.

3.2 Оценка стабилизационных свойств разработанных индуктивно-емкостных преобразователей

Основными критериями эффективности работы ССТ являются коэффициент стабилизации тока нагрузки $k_{ст.}$, относительные отклонения выходного тока ИЕП δ ,

изменения крутизны внешней характеристики ИЕП при изменении частоты сети ω_c , коэффициента связи $k_{св.}$ (для схем с взаимоиндуктивной связью), добротности выходного контура Q , величин емкости и индуктивности элементов ИЕП (эквивалентно изменению частоты сети) и при нарушении условия симметричности для симметричных ИЕП. Рассмотрим один из критериев стабилизации – коэффициент стабилизации тока нагрузки – для различных схемотехнических исполнений МИЭК, отличающихся вариантами соединения секций и подключения источника питания и нагрузки:

$$0 < \delta = \frac{(I_{н.})^2 \cdot Z_{н.}}{(I_n)^2 \cdot Z_{н. \max.}} \leq 1.$$

При питании ИЕП от инвертора стабилизация возможна лишь с определенной точностью. Следовательно, возникает задача определения ширины диапазон изменения сопротивления нагрузки, при котором КПД будет максимальным, и выявления зависимости коэффициента стабилизации тока нагрузки от частоты [2, 3].

Коэффициент стабилизации тока нагрузки и энергетические показатели зависят от добротности ИЕП, которая определяется способом соединения элементов ИЕП, соотношением реактивного и активного сопротивлений резонансного контура ИЕП. Резкое увеличение тока нагрузки ведет к нарушению стабилизации.

Свойства реального преобразователя приближаются к свойствам идеального тем ближе, чем меньше значение активного сопротивления, т.е. чем больше добротность

$$Q = \frac{\omega \cdot L}{R}.$$

При высокой добротности резонансного контура ИЕП ток на выходе ИЕП незначительно зависит от сопротивления нагрузки и прямо пропорционален питающему напряжению. Идеальными стабилизирующими свойствами по току нагрузки преобразователя обладают схемы, описанные в [6, 60]. Однако, чем выше значение добротности ИЕП, тем больше его масса и габариты.

Также к параметрам стабилизации ИЕП относится коэффициент отклонения действующего значения тока нагрузки k , определяемый по формуле:

$$k = \frac{\Delta I_d}{I_\rho} \cdot 100\%,$$

где $\Delta I_d = I_{dmax} - I_{dmin}$ – диапазон изменения действующего значения тока нагрузки,

I_ρ – действующее значение тока нагрузки при значении сопротивления нагрузки равном эквивалентному волновому сопротивлению ρ схемы.

Основными задачами исследования при построении ССТ на основе ИЕП являются изучение режимов работы МИЭК, оценка коэффициента стабилизации тока нагрузки и частотных характеристик, определение диапазона изменения нагрузки, при котором осуществляется стабилизация с требуемой точностью.

3.2.1 Исследование стабилизационных свойств индуктивно-емкостного преобразователя на основе односекционной структуры многофункционального интегрированного электромагнитного компонента

Разработана математическая модель ИЕП на основе односекционного МИЭК для определения ширины диапазона нагрузки, в котором осуществляется стабилизация тока нагрузки с требуемой точностью, и зависимости коэффициента стабилизации тока нагрузки от частоты и определяющая ЭМП в МИЭК системой линейных алгебраических уравнений с интегральными параметрами [60]. На рисунке 3.14 односекционный МИЭК изображен схематично в развернутом виде.

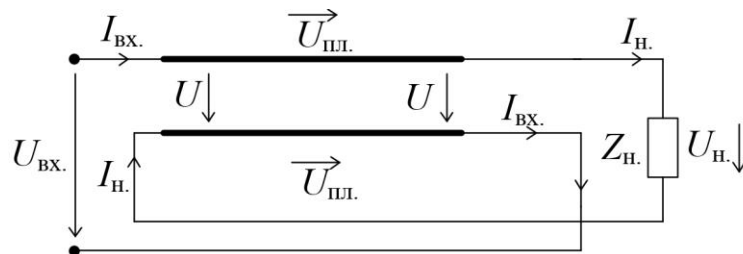


Рисунок 3.14 – Односекционный МИЭК с диагональным подключением источника питания и нагрузки

Система уравнений, описывающая ЭМП в односекционном МИЭК с диагональным подключением источника питания и нагрузки, представляет собой следующий состав уравнений:

$$\begin{cases} \underline{U}_{\text{ВХ.}} = \underline{U}_{\text{ПЛ.}} + \underline{U}, \\ \underline{U} = \frac{\underline{I}_{\text{ВХ.}} - \underline{I}_{\text{Н.}}}{j \cdot \omega \cdot C}, \\ \underline{U}_{\text{ПЛ.}} = (R + j \cdot \omega \cdot (L + M)) \cdot (\underline{I}_{\text{ВХ.}} + \underline{I}_{\text{Н.}}), \\ \underline{U}_{\text{Н.}} + \underline{U}_{\text{ПЛ.}} = \underline{U}. \end{cases}$$

С помощью математической модели получено, что ток нагрузки в резонансном режиме работы ИЕП не зависит от величины сопротивления нагрузки и пропорционален напряжению сети:

$$I_{\text{Н.}} = -0,5 \cdot j \cdot U_{\text{ВХ.}} \cdot \omega \cdot C.$$

Результаты исследований на основе математической модели ИЕП на базе МИЭК показывают, что схмотехническое исполнение МИЭК с диагональным подключением источника питания и нагрузки обладает стабилизирующими свойствами по току нагрузки в пределах $\pm 15\%$ в диапазоне частот от $0,9 \cdot f_{\text{рез.}}$ до $1,2 \cdot f_{\text{рез.}}$ (рисунки 3.15, 3.16, 3.17) [100].

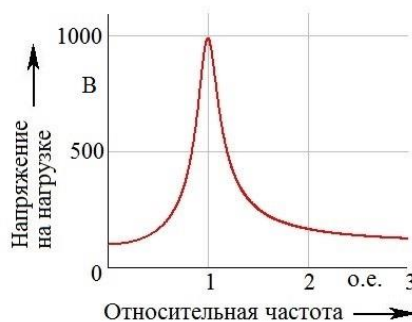


Рисунок 3.15 – АЧХ напряжения на нагрузке

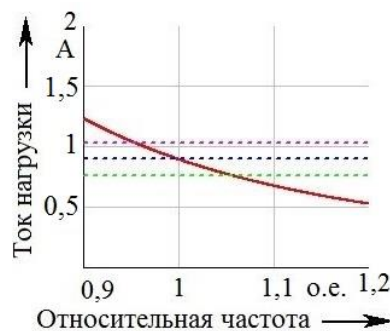


Рисунок 3.16 – АЧХ тока нагрузки

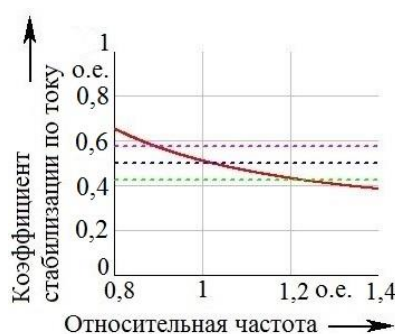


Рисунок 3.17 – АЧХ коэффициента стабилизации тока нагрузки

3.2.2 Исследование стабилизационных свойств индуктивно-емкостных преобразователей на основе двухсекционной структуры многофункционального интегрированного электромагнитного компонента

Схематические исполнения двухсекционных МИЭК имеют несколько вариаций [60, 64]. Многофункциональный интегрированный электромагнитный компонент в зависимости от конструкции сочетает в себе свойства дискретных ЭМЭ таких, как конденсатор, катушка индуктивности, трансформатор [10, 52, 82].

Рассмотрим с помощью разработанной математической модели работу схем ИЕП на основе двухсекционных МИЭК, представленных в таблице 3.1, при изменении коэффициента стабилизации тока нагрузки в диапазоне от -7% до 7% для определения диапазона изменения сопротивления нагрузки, при котором КПД будет максимальным, и зависимости коэффициента стабилизации тока нагрузки от частоты [101, 102, 103].

На рисунке 3.18 показана зависимость тока нагрузки от относительной частоты для разработанных схем ИЕП, представленных в таблице 3.1.

Произведем расчет параметров стабилизации ИЕП на основе двухсекционной структуры МИЭК для трех диапазонов изменения значения сопротивления нагрузки R : от $0,1 \cdot \rho$ до $5 \cdot \rho$, от $0,1 \cdot \rho$ до $10 \cdot \rho$, от $0,1 \cdot \rho$ до $50 \cdot \rho$, от $0,1 \cdot \rho$ до $100 \cdot \rho$, где ρ – волновое сопротивление [6]. В результате расчета показано, как параметры стабилизации исследуемого схемотехнического решения ИЕП, выполненного на основе МИЭК, зависят от значений сопротивления нагрузки, изменяющихся в диапазоне от 1 до 1000 Ом с шагом 1 Ом (при значении эквивалентного волнового сопротивления

$\rho = 10 \text{ Ом}$). Подобным образом определены диапазоны изменения и значения коэффициентов отклонения действующего значения тока нагрузки для различных диапазонов изменения значения сопротивления нагрузки для разработанных схем ИЕП [104].

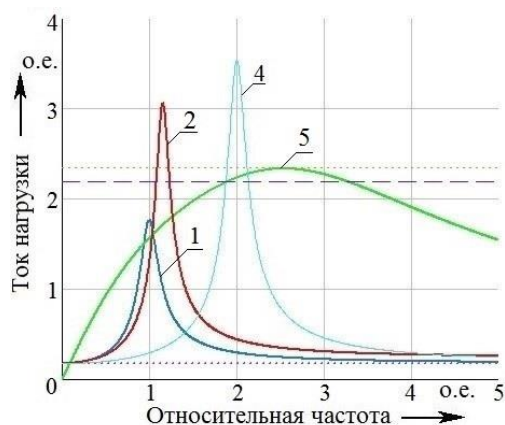


Рисунок 3.18 – АЧХ тока нагрузки от частоты для различных способов подключения источника питания и нагрузки

В таблице 3.2 показано, что в диапазоне изменения сопротивления нагрузки от $0,1 \cdot \rho$ до $5 \cdot \rho$ (волнового сопротивления) схемотехническое решение ИЕП на основе МИЭК, схема которого представлена в пункте 3 таблицы 3.1, обладает лучшими стабилизирующими свойствами, в частности характеризуется коэффициентом отклонения действующего значения тока нагрузки ($k = 1,9 \%$) в 5 раз меньшим, чем у схем ИЕП на основе дискретных ЭМЭ ($k = 9,45 \%$).

Таблица 3.2 – Параметры стабилизации ИЕП

Параметр стабилизации ИЕП	Сопротивление нагрузки, Ом			
	1...50	1...100	1...500	1...1000
коэффициент отклонения действующего значения тока нагрузки k , %	1,93	8,662	17	40,3
изменение действующего значения тока нагрузки ΔI_d , А	0,2	0,9	1,77	4,19

Необходимый уровень стабилизации тока нагрузки для схемы ИЕП, представленной в пункте 3 таблицы 3.1, обеспечивается в диапазоне изменения частоты от $0,75 \cdot f_{\text{рез.}}$ до $1,35 \cdot f_{\text{рез.}}$. Результаты исследований на основе математической модели ИЕП на базе МИЭК показывают, что стабилизация тока осуществляется в

диапазоне изменения сопротивления нагрузки от $0,01 \cdot R_n$ до $120 \cdot R_n$. Данная схемотехническое исполнение является наиболее пригодным из рассмотренных схем при питании от источника напряжения с высшими гармониками.

Исследуем электромагнитные процессы в ССТ с ИЕП на основе МИЭК с использованием разработанной математической модели конкретных схем с заданными интегральными параметрами индуктивности обкладок L и общей емкости C МИЭК, исходя из необходимости настройки ИЕП в резонанс. Также проверим, выполняется ли обязательное условие работы ИЕП в режиме короткого замыкания.

Произведенные исследования ЭМП на основе созданной математической модели показывают независимость тока нагрузки от сопротивления нагрузки для различных способов подключения выводов МИЭК, представленных в таблице 3.1. Получено, что значение тока нагрузки прямо пропорционально значению напряжения сети и не зависит от значения сопротивления нагрузки в резонансном режиме работы ИЕП.

Разработана математическая модель ИЕП на основе двухсекционного МИЭК, схема замещения которого представлена на рисунке 3.19, для определения зависимости коэффициента стабилизации тока нагрузки от частоты и ширины диапазона нагрузки, при котором осуществляется стабилизация, с требуемой точностью. Рассмотрим расчет частотных характеристик двухсекционного МИЭК, представленного на рисунке 3.19 [63].

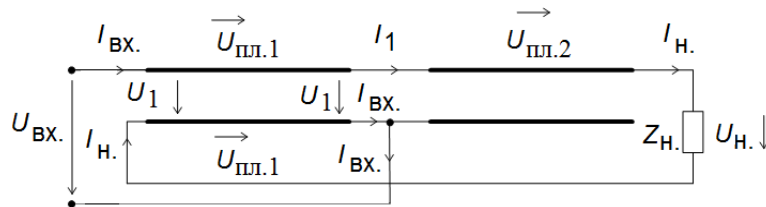


Рисунок 3.19 – Двухсекционный МИЭК с последовательным соединением секций и диагональным подключением источника питания и нагрузки с выводом в середине вторичной обкладки

Система уравнений, описывающая процессы в ИЕП на основе МИЭК

$$\begin{cases} \underline{U}_{\text{вх.}} = \underline{U}_{\text{пл.1}} + \underline{U}_1, \\ \underline{U}_1 = \frac{\underline{I}_{\text{вх.}} - \underline{I}_1}{j \cdot \omega \cdot C_1}, \\ \underline{U}_2 = \frac{\underline{I}_1 - \underline{I}_{\text{н.}}}{j \cdot \omega \cdot C_2}, \\ \underline{U}_{\text{пл.1}} = (R_1 + j \cdot \omega \cdot (L_1 + M)) \cdot (\underline{I}_{\text{вх.}} + \underline{I}_{\text{н.}}), \\ \underline{U}_1 = \underline{U}_{\text{пл.1}} + \underline{U}_{\text{пл.2}} + \underline{U}_{\text{н.}}, \\ \underline{I}_1 = \underline{I}_{\text{н.}}, \\ \underline{I}_{\text{н.}} = \frac{\omega \cdot C \cdot \underline{U}_{\text{вх.}}}{2 \cdot j}, \\ \underline{I}_{\text{н.}} = \frac{\underline{U}_{\text{вх.}}}{2 \cdot (R + j \cdot \omega \cdot (L + M))}. \end{cases}$$

На рисунках с 3.20 по 3.23 показаны частотные характеристики исследуемого схемотехнического решения МИЭК с максимальным относительным значением коэффициента усиления по напряжению, равном 13,5, при добротности, равной 10.

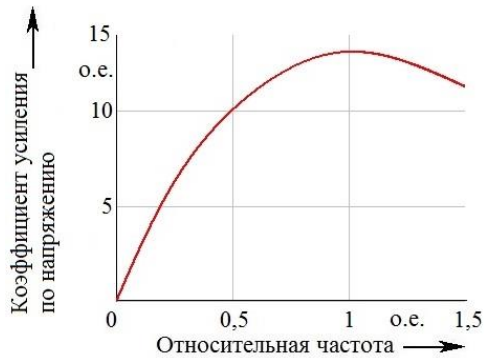


Рисунок 3.20 – АЧХ коэффициента усиления по напряжению $k_u = U_{\text{н.}}/U_{\text{вх.}}$

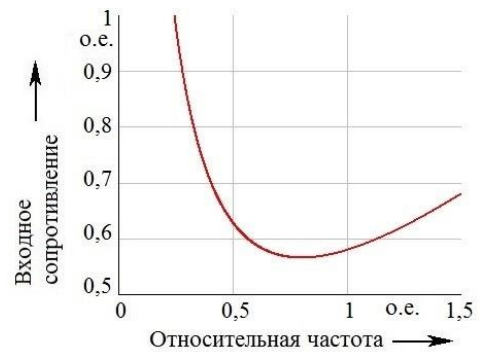


Рисунок 3.21 – АЧХ входного сопротивления $Z_{\text{вх.}} = U_{\text{вх.}}/I_{\text{вх.}}$

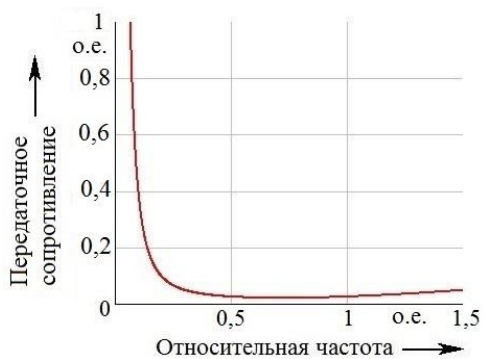


Рисунок 3.22 – АЧХ передаточного сопротивления $Z_{\text{п.}} = U_{\text{н.}}/I_{\text{вх.}}$

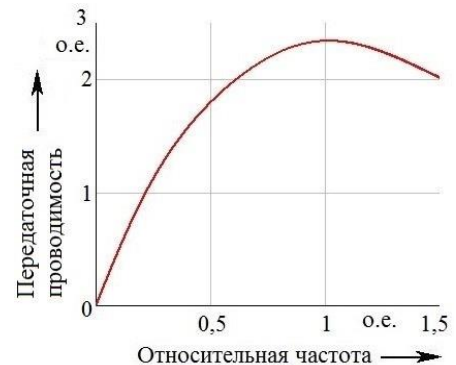


Рисунок 3.23 – АЧХ передаточной проводимости $Y_{\text{п.}} = I_{\text{н.}}/U_{\text{вх.}}$

На рисунке 3.24 показана зависимость тока нагрузки от относительной частоты. Необходимый уровень стабилизации тока нагрузки обеспечивается в диапазоне изменения частоты от $0,6 \cdot f_{рез.}$ до $1,55 \cdot f_{рез.}$.

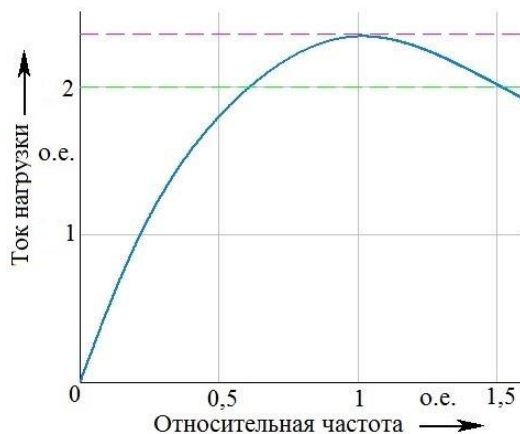


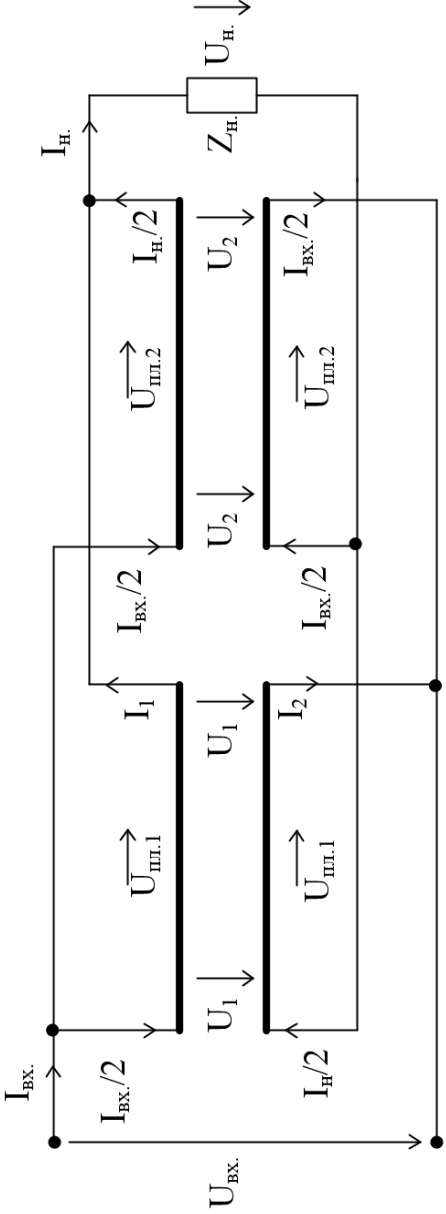
Рисунок 3.24 – АЧХ тока нагрузки

Показано, что МИЭК с диагональным подключением источника питания и нагрузки и последовательным соединением секций с электрическим выводом в середине вторичной обкладки является наиболее оптимальным для следующих электротехнических комплексов, систем и устройств: ИЕП, систем заряда ЕН. Применение МИЭК в системах заряда ЕН снижает массу и габариты устройств [54].

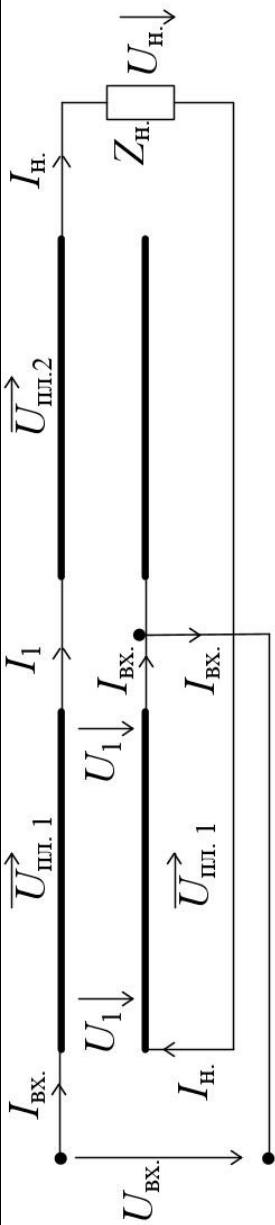
В работе [105] предложены технические решения схем ИЕП, часть из которых исследована выше в пункте 3.2.2. Продолжим исследование схем, которые не вошли в таблицу 3.1. Для совместной оценки параметров и частотных характеристик схем ИЕП относительно друг друга приведем их в таблице вместе с ранее изученными схемами ИЕП (таблица 3.3).

На рисунках с 3.25 по 3.28 представлены частотные характеристики двухсекционных МИЭК различного схмотехнического исполнения, результаты исследования которых показывают, что максимальный коэффициент усиления по напряжению достигается в схеме № 3 (в 3,75 раза больше, чем для схемы №2 и в 5,55 раза больше, чем для схемы №1) (рисунок 3.25).

Таблица 3.3 – Схемотехнические исполнения, системы уравнений, описывающие процессы в двухсекционном МИЭК при различных способах соединения его секций и подключения источника питания и нагрузки

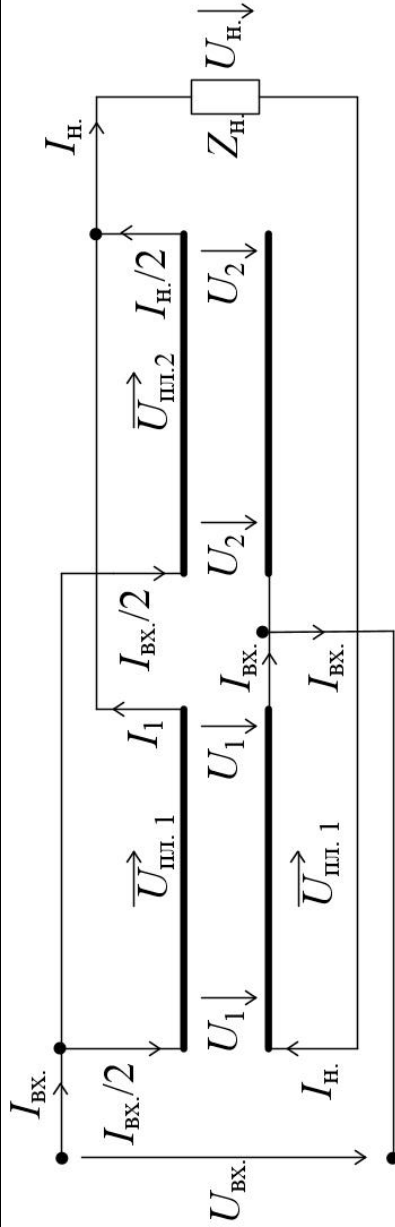
№	Схемы ИЕП	Системы уравнений, описывающие процессы в ИЕП на основе МИЭК
1		$\left\{ \begin{aligned} \underline{U}_{\text{ВХ.}} &= \underline{U}_{\text{пл.1}} + \underline{U}_2, \\ \underline{U}_1 &= \frac{\frac{I_{\text{ВХ.}}}{2} - \underline{I}_1}{j \cdot \omega \cdot C_1}, \\ \underline{U}_2 &= \frac{\underline{I}_{\text{ВХ.}} - \underline{I}_{\text{ВХ.}}}{2 \cdot j \cdot \omega \cdot C_2}, \\ \underline{U}_{\text{пл.1}} &= (R_1 + j \cdot \omega \cdot (L_1 + M)) \cdot \left(\frac{\underline{I}_{\text{ВХ.}} + \underline{I}_{\text{ВХ.}}}{2} \right), \\ \underline{U}_{\text{пл.2}} &= (R_2 + j \cdot \omega \cdot (L_2 + M)) \cdot \left(\frac{\underline{I}_{\text{ВХ.}} + \underline{I}_{\text{ВХ.}}}{2} \right), \\ \underline{U}_1 &= \underline{U}_{\text{пл.1}} + \underline{U}_{\text{ВХ.}}, \\ \underline{I}_1 &= \frac{\underline{I}_{\text{ВХ.}}}{2}, \\ \underline{I}_2 &= \frac{\underline{I}_{\text{ВХ.}}}{2}, \\ \underline{I}_{\text{ВХ.}} &= \frac{\omega \cdot C \cdot \underline{U}_{\text{ВХ.}}}{2 \cdot j}, \\ \underline{I}_{\text{ВХ.}} &= \frac{\underline{U}_{\text{ВХ.}}}{2 \cdot (R + j \cdot \omega \cdot (L + 2 \cdot M))}. \end{aligned} \right.$

Двухсекционный МИЭК с последовательным соединением секций и диагональным подключением источника питания и нагрузки с выводом в середине вторичной обкладки



$$\left\{ \begin{aligned} \underline{U}_{\text{BX.}} &= \underline{U}_{\text{пл.1}} + \underline{U}_1, \\ \underline{U}_1 &= \frac{\underline{I} - \underline{I}_1}{j \cdot \omega \cdot C_1}, \\ \underline{U}_2 &= \frac{\underline{I}_1 - \underline{I}_H}{j \cdot \omega \cdot C_2}, \\ \underline{U}_{\text{пл.1}} &= (R_1 + j \cdot \omega \cdot (L_1 + M)) \cdot (\underline{I}_{\text{BX.}} + \underline{I}_H), \\ \underline{U}_1 &= \underline{U}_{\text{пл.1}} + \underline{U}_{\text{пл.2}} + \underline{U}_H, \\ \underline{I}_1 &= \underline{I}_H, \\ \underline{I}_H &= \frac{\omega \cdot C \cdot \underline{U}_{\text{BX.}}}{2 \cdot j}, \\ \underline{I}_H &= \frac{\underline{U}_{\text{BX.}}}{2 \cdot (R + j \cdot \omega \cdot (L + M))}. \end{aligned} \right.$$

Двухсекционный МИЭК с параллельным соединением секций и диагональным подключением источника питания и нагрузки с выводом в середине вторичной обкладки



3

$$\left\{ \begin{aligned} \underline{U}_{\text{BX.}} &= \underline{U}_{\text{пл.1}} + \underline{U}_1, \\ \underline{U}_1 &= \frac{\underline{I}_{\text{BX.}} - \underline{I}_1}{j \cdot \omega \cdot C_1}, \\ \underline{U}_2 &= \frac{\underline{I}_{\text{BX.}} - \underline{I}_2}{2 \cdot j \cdot \omega \cdot C_2}, \\ \underline{U}_{\text{пл.1}} &= (R_1 + j \cdot \omega \cdot (L_1 + M)) \cdot \left(\frac{\underline{I}_{\text{BX.}}}{2} + \underline{I}_H \right), \\ \underline{U}_{\text{пл.2}} &= (R_2 + j \cdot \omega \cdot L_2) \cdot \underline{I}_{\text{BX.}}, \\ \underline{U}_1 &= \underline{U}_{\text{пл.1}} + \underline{U}_H, \\ \underline{I}_1 &= \frac{\underline{I}_H}{2}, \\ \underline{I}_2 &= \frac{\underline{I}_{\text{BX.}}}{2}, \\ \underline{I}_H &= \frac{\omega \cdot C \cdot \underline{U}_{\text{BX.}}}{2 \cdot j}, \\ \underline{I}_H &= \frac{\underline{U}_{\text{BX.}}}{2 \cdot (R + j \cdot \omega \cdot (L + M))}. \end{aligned} \right.$$

Необходимое условие работы ИЕП – снижение входного сопротивления с ростом частоты – соблюдается для всех трех схем, представленных в таблице 3.3. Данное условие соблюдается для схемы № 1 в диапазоне изменения частоты от $0,15 \cdot f_{рез.}$ до $1,05 \cdot f_{рез.}$, для схемы № 2 – от $0,15 \cdot f_{рез.}$ до $1,6 \cdot f_{рез.}$, для схемы № 3 – от $0,15 \cdot f_{рез.}$ до $1,1 \cdot f_{рез.}$ (рисунок 3.26).

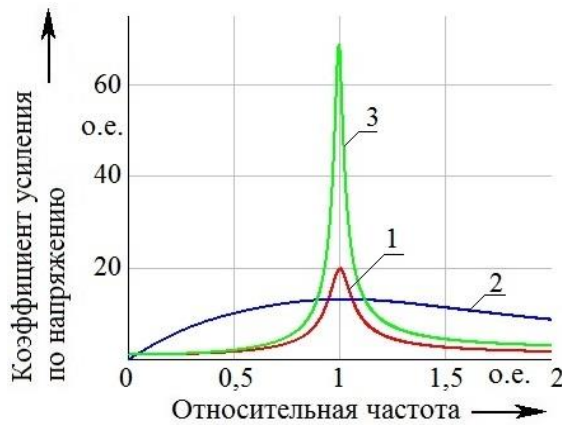


Рисунок 3.25 – АЧХ коэффициента усиления по напряжению $k_u = \underline{U}_H / \underline{U}_{ВХ.}$

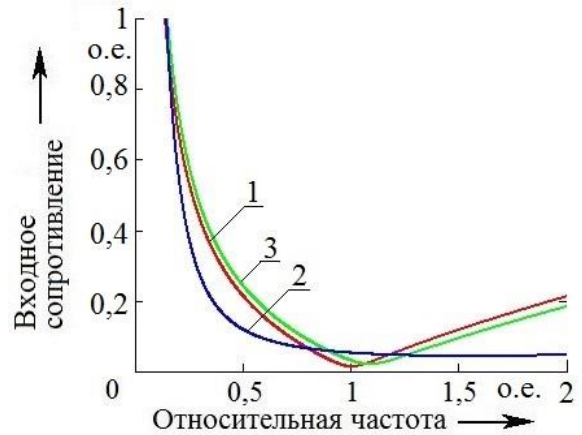


Рисунок 3.26 – АЧХ входного сопротивления $\underline{Z}_{ВХ.} = \underline{U}_{ВХ.} / \underline{I}_{ВХ.}$

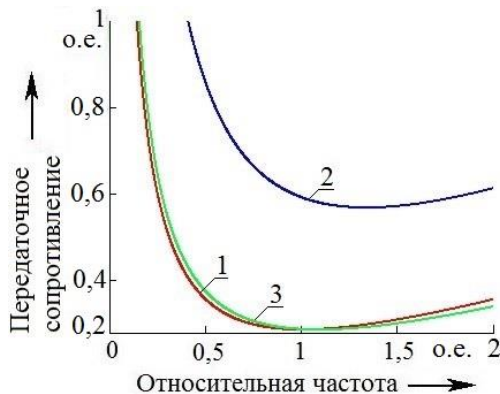


Рисунок 3.27 – АЧХ передаточного сопротивления $\underline{Z}_{П.} = \underline{U}_H / \underline{I}_{ВХ.}$

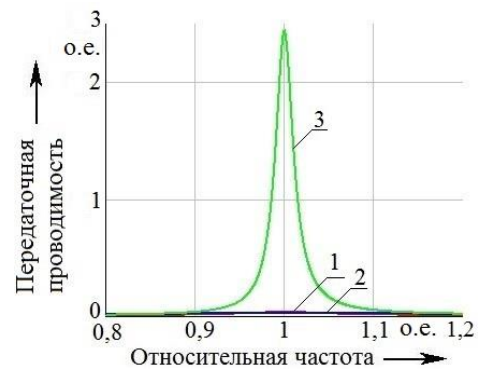


Рисунок 3.28 – АЧХ передаточной проводимости $\underline{Y}_{П.} = \underline{I}_H / \underline{U}_{ВХ.}$

Передаточное сопротивление снижается при возрастании частоты: для схемы № 1 в диапазоне изменения частоты от $0,15 \cdot f_{рез.}$ до $1,05 \cdot f_{рез.}$; для схемы № 2 в диапазоне изменения частоты от $0,15 \cdot f_{рез.}$ до $1,4 \cdot f_{рез.}$; для схемы № 3 в диапазоне изменения частоты от $0,15 \cdot f_{рез.}$ до $1,15 \cdot f_{рез.}$. При этом для схемы № 1 снижение передаточного сопротивления с ростом частоты происходит еще быстрее (рисунок 3.27).

Увеличение передаточной проводимости с ростом частоты выполняется для всех схем в диапазоне изменения частоты от $0,05 \cdot f_{рез.}$ до $1,05 \cdot f_{рез.}$ (рисунок 3.28). Однако для схем № 1 и № 3 увеличение передаточной проводимости с ростом частоты происходит быстрее и более значительно (в 2,1 раза) в отличие от схемы № 2.

В результате исследований стабилизационных свойств ИЕП при различных способах включения секций МИЭК, проведенных на основе разработанных математических моделей, определено схмотехническое исполнение ИЕП, обладающее наилучшими стабилизирующими свойствами по току нагрузки (схема № 2) в пределах $\pm 15\%$ в диапазоне изменения частоты от $0,75 \cdot f_{рез.}$ до $1,35 \cdot f_{рез.}$ (рисунок 3.29), и выявлена схема ИЕП с максимальным коэффициентом усиления по напряжению осуществляющий стабилизацию тока нагрузки большей амплитуды (схема № 3).

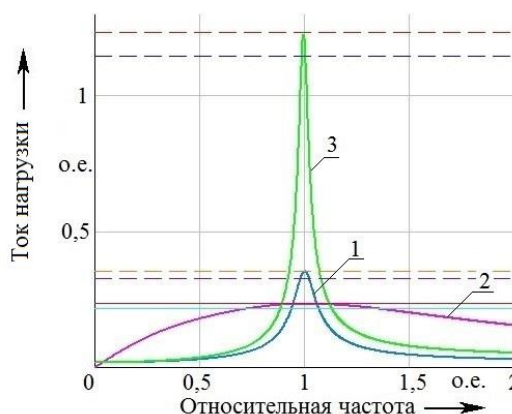


Рисунок 3.29 – АЧХ тока нагрузки

Схема № 1 стабилизирует ток большей амплитуды ($i_{н.1} = 0,352 > i_{н.2} = 0,235$) с большим коэффициентом усиления по напряжению ($k_{U1} = 20 > k_{U2} = 13,5$) по сравнению со схемой № 2, но в узком диапазоне изменения частоты (от $0,98 \cdot f_{рез.}$ до $1,02 \cdot f_{рез.}$).

Схема № 2 характеризуется более широким диапазоном изменения частоты (от $0,75 \cdot f_{рез.}$ до $1,35 \cdot f_{рез.}$) по сравнению со схемами № 1 и № 3.

Схема № 3 осуществляет стабилизацию тока нагрузки большей амплитуды ($i_{н.3} = 1,23 > i_{н.1} = 0,352 > i_{н.2} = 0,235$), обладает наибольшим коэффициентом усиления по напряжению ($k_{U3} = 75 > k_{U1} = 20 > k_{U2} = 13,5$) [55, 61].

Результаты моделирования показывают, что ССТ на базе ИЕП позволяют питать нагрузку при постоянстве подводимой к ней мощности без введения в схему дополнительных активных сопротивлений, а также уменьшить установленную мощность источника питания [20, 106 – 108]. Преимущества такой системы особенно важны в установках большой мощности, например, в импульсной энергетике и электротермии [109 – 113]. Этим объясняется, что ИЕП источников напряжения в источники тока широко используются в ССТ для систем заряда ЕН, генераторов высоковольтных импульсов, электротермических систем, газоразрядных ламп [114 – 120].

По результатам исследования стабилизационных свойств ИЕП на основе двухсекционной структуры МИЭК приведены примеры применения и рекомендации по использованию различных схематических исполнений рассмотренной структуры МИЭК [60].

3.3 Исследование режимов работы многофункциональных интегрированных электромагнитных компонентов в электротехнических системах и устройствах

В настоящее время множество областей техники использует заряд батарей конденсаторов с последующим быстрым разрядом на нагрузку. В нефтяной промышленности разрядно-импульсные технологии применяются там, где осуществляется разряд емкости на разрядный промежуток, в частности в электрогидравлических генераторах для интенсификации добычи нефти из продуктивных пластов.

В [121, 122, 123] теоретически обоснована эффективность заряда накопительных конденсаторов неизменным током и показано, что именно этот

метод обеспечивает наибольший КПД, близкий к 100 %. Наиболее оптимальным является заряд емкости током неизменной формы, по этой причине целесообразно применять ИЕП. Существует целая отрасль электротехники – импульсная энергетика, где для заряда батарей накопительных конденсаторов используются ИЕП. Кроме того, применение ИЕП в системах заряда ЕН позволяет обеспечить рост напряжения на конденсаторе по линейному закону, что позволяет регулировать время заряда в широких пределах и повысить точность заданного уровня напряжения на ЕН [59].

Однако не только высокий КПД обуславливает применение ИЕП в качестве зарядного устройства. Не менее важными, а иногда и определяющими, являются следующие свойства зарядных цепей на базе ИЕП:

- отсутствие бросков тока в питающей сети и связанных с ними посадок напряжения, отрицательно влияющих на работу других потребителей, питающихся от той же сети;
- возможность эффективного и рационального управления процессом заряда с помощью коммутации полупроводниковых ключей;
- нечувствительность к токовым перегрузкам в момент разряда ЕН на нагрузку (как правило, низкоомную);
- возможность обеспечения независимости заряда нескольких накопителей от одного зарядного устройства, работы нескольких зарядных устройств на один мощный накопитель.

Совокупность данных ценных качеств обусловила широкое внедрение ИЕП в область импульсной электроэнергетики.

Специфические вопросы возникают при создании высоковольтных систем заряда ЕН от низковольтной сети постоянного тока. В этом случае обязательно применение промежуточного инвертора, преобразующего постоянное напряжение в переменное, как правило, с несинусоидальной формой кривой. В этом случае ИЕП помимо своей основной функции выполняет функцию фильтра низких частот.

Улучшить технико-экономические показатели ИЕП, ускорить процесс разработки, повысить технологичность и надежность, снизить себестоимость ССТ позволяет применение МИЭК в качестве ИЕП [124].

3.3.1 Исследование режимов работы односекционных многофункциональных интегрированных электромагнитных компонентов в системах стабилизации тока

Поставлена задача исследования режимов работы системы заряда ЕН на базе ИЕП, выполненного на основе односекционного МИЭК. Реализована модель системы заряда ЕН на базе полумостовой схемы с ИЕП, включенным в диагональ, в среде *Simulink* пакета *MatLab* с использованием библиотеки блоков *SimPowerSystems* (рисунок 3.30).

Смоделирована и экспериментально исследована схема заряда ЕН с последующим разрядом на активную нагрузку.

Модель и макетный образец системы заряда ЕН состоят из источника постоянного напряжения, автономного инвертора напряжения (полумостовая схема), односекционного МИЭК, работающего в резонансном режиме и выполняющего роль ИЕП, ЕН с разрядной цепью.

Проведены исследования уровней напряжения на различных точках четырехполюсника: на обкладках и емкости МИЭК, в диагоналях инвертора – с целью нахождения максимального напряжения. В результате компьютерного моделирования и экспериментальных исследований получены графики напряжений на элементах полумостовой схемы системы заряда ЕН, представленные на рисунках с 3.31 по 3.34.

На вход инвертора подается постоянное напряжение амплитудой 4,2 В (рисунок 3.31). На рисунке 3.32 показан график напряжения на индуктивности (проводящей обкладке МИЭК) и емкости ИЕП в резонансном режиме работы (амплитуда напряжения 30 В свидетельствует о добротности, равной 7). Работа в резонансном режиме с добротностью Q позволяет получить на обкладках МИЭК напряжение, равное $Q \cdot U_{\text{вх.}}$.

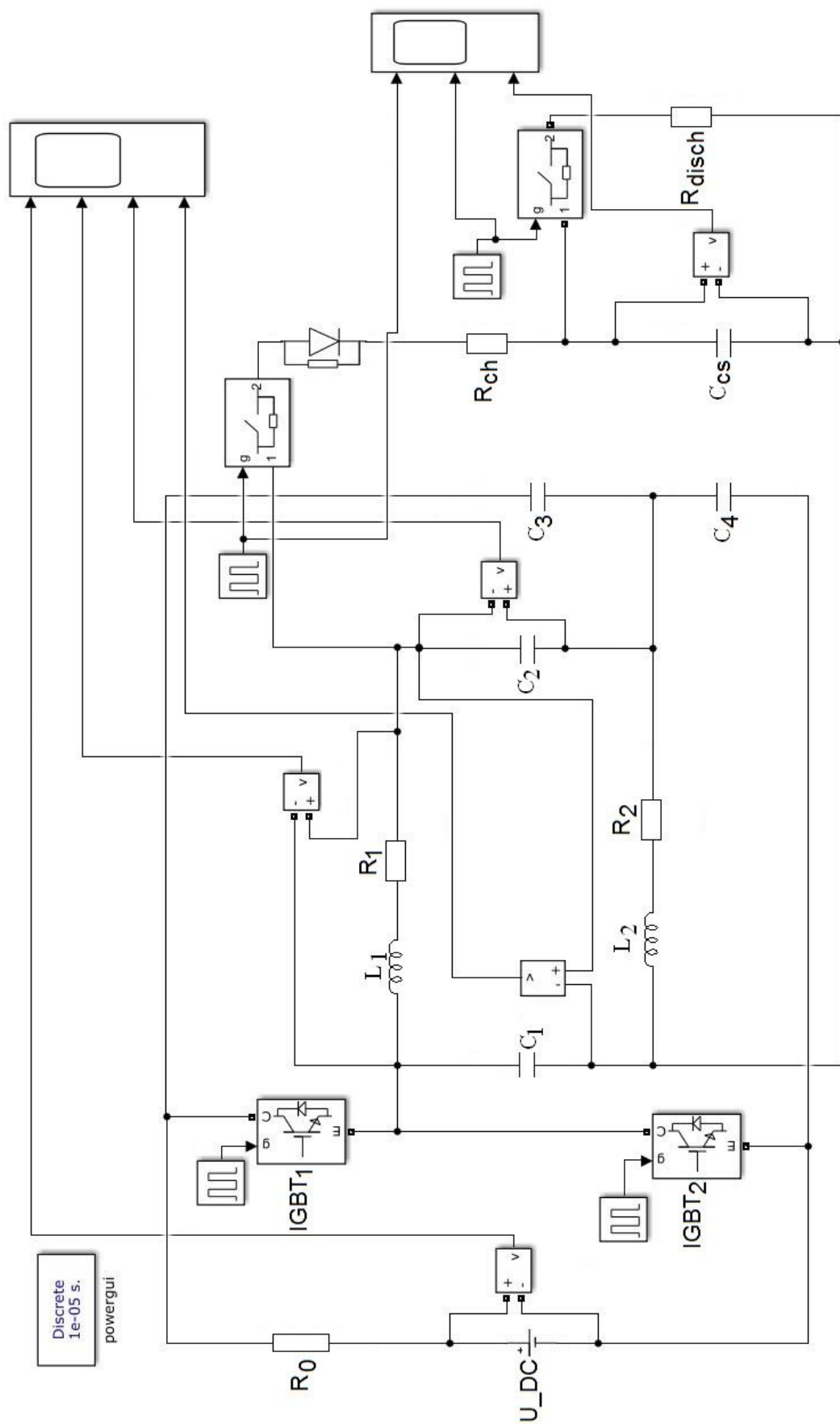
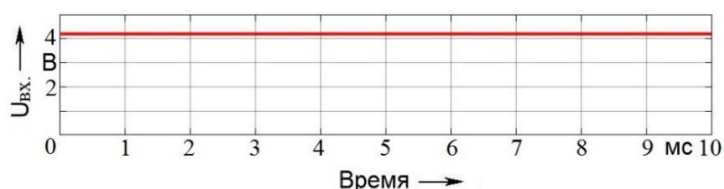
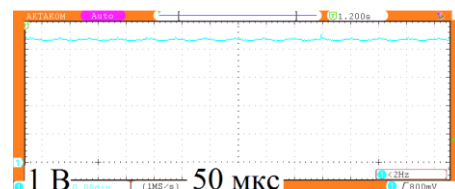


Рисунок 3.30 — Компьютерная модель системы заряда ЕН с ИЕП на основе односекционного МИЭК



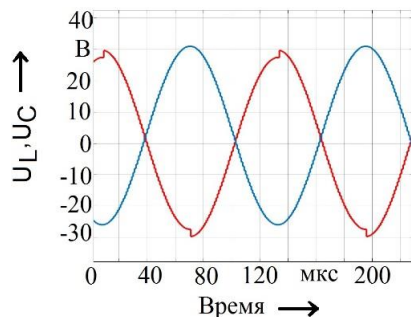
а)



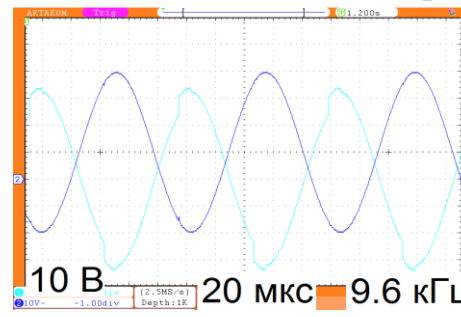
б)

Рисунок 3.31 – График напряжения на входе инвертора:

а – полученный с помощью модели; б – полученный с помощью осциллографа



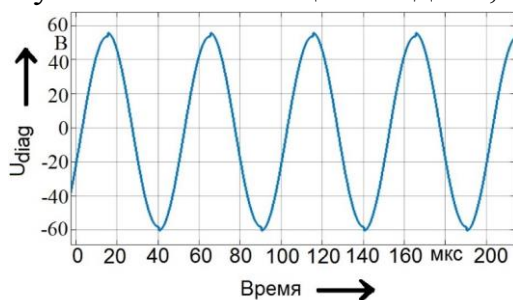
а)



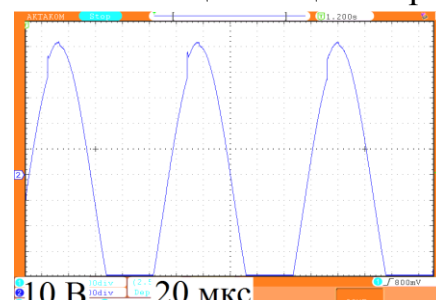
б)

Рисунок 3.32 – График напряжения на обкладке (красным/голубым цветом) и емкости (синим/фиолетовым цветом) МИЭК:

а – полученный с помощью модели; б – полученный с помощью осциллографа

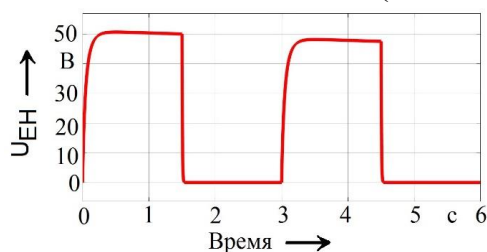


а)

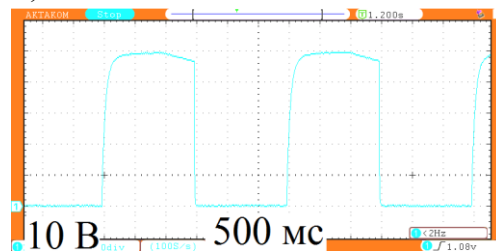


б)

Рисунок 3.33 – График напряжения в диагонали инвертора:

а – полученный с помощью модели; б – полученный с помощью осциллографа
(с делителем «*10»)

а)



б)

Рисунок 3.34 – График напряжения на ЕН:

а – полученный с помощью модели; б – полученный с помощью осциллографа

На рисунке 3.33 приведен график напряжения в диагонали инвертора (амплитудой 50 В). Получено, что максимальное напряжение достигается в диагонали инвертора. В диагонали инвертора достигается уровень напряжения $2 \cdot U_{\text{вх.}}$.

На рисунке 3.34 показан график перезаряда ЕН (емкостью 15,5 мкФ, сопротивление резистора в цепи заряда равно 500 Ом) на активную нагрузку (резистор сопротивлением 345 Ом). Из графика видно, что ЕН заряжается до уровня напряжения в 11,9 раз превышающего напряжение источника питания за счет включения ЕН в диагональ полумостовой схемы и резонансного режима работы МИЭК. Выявлен эффект значительного повышения напряжения. Включение нагрузки в диагональ инвертора позволяет достичь уровня напряжения $2 \cdot Q \cdot U_{\text{вх.}}$.

Таким образом, доказана энергетическая эффективность и целесообразность создания систем заряда ЕН с ИЕП, выполненных на основе МИЭК, в особенности для высоковольтных систем, где помимо стабилизации тока требуется значительное повышение напряжения.

Проведено экспериментальное подтверждение адекватности разработанной модели на макетном образце МИЭК. Расхождение результатов эксперимента и моделирования не превышает 5 %.

Следовательно, разработанная компьютерная модель может использоваться для исследования режимов работы более сложных схем ИЕП (например, на основе двухсекционного МИЭК), в частности, в системах заряда ЕН с ИЕП.

Кроме того, разработанная компьютерная модель может использоваться для исследования режимов работы схем ИЕП на основе МИЭК в высоковольтных системах заряда ЕН, экспериментальное исследование которых сопряжено со значительными финансовыми затратами и характеризуется большей сложностью с точки зрения реализации макетного образца для проведения исследований.

3.3.2 *Исследование режимов работы двухсекционных многофункциональных интегрированных электромагнитных компонентов в системах стабилизации тока*

Поставлена задача исследования режимов работы системы заряда ЕН на базе ИЕП, выполненного на основе двухсекционного МИЭК, представляющего собой два идентичных с точки зрения конструкционного исполнения односекционных МИЭК, аналогичных как по электрическим параметрам (индуктивность и емкость обкладок), так и по геометрическим размерам (габаритам) и массе. Реализована модель системы заряда ЕН на базе полумостовой схемы с ИЕП, включенным в диагональ, в среде *Simulink* пакета *MatLab* (рисунок 3.35).

Смоделирована и исследована схема заряда ЕН с последующим разрядом на активную нагрузку.

Модель системы заряда ЕН состоит из источника постоянного напряжения, автономного инвертора напряжения (полумостовая схема), двухсекционного МИЭК, работающего в резонансном режиме и выполняющего роль ИЕП, ЕН с разрядной цепью. В случае последовательного соединения секций и диагонального включения в схему двухсекционный МИЭК работает как односекционный МИЭК.

В результате исследования модели получены графики напряжений на элементах полумостовой схемы системы заряда ЕН, представленные на рисунках с 3.36 по 3.40.

На вход инвертора подается постоянное напряжение амплитудой 540 В (рисунок 3.36). На рисунке 3.37 показаны графики напряжений на индуктивности (проводящей обкладке МИЭК) и емкости ИЕП в резонансном режиме работы (амплитуда напряжения 6,48 кВ свидетельствует о добротности, равной 12).

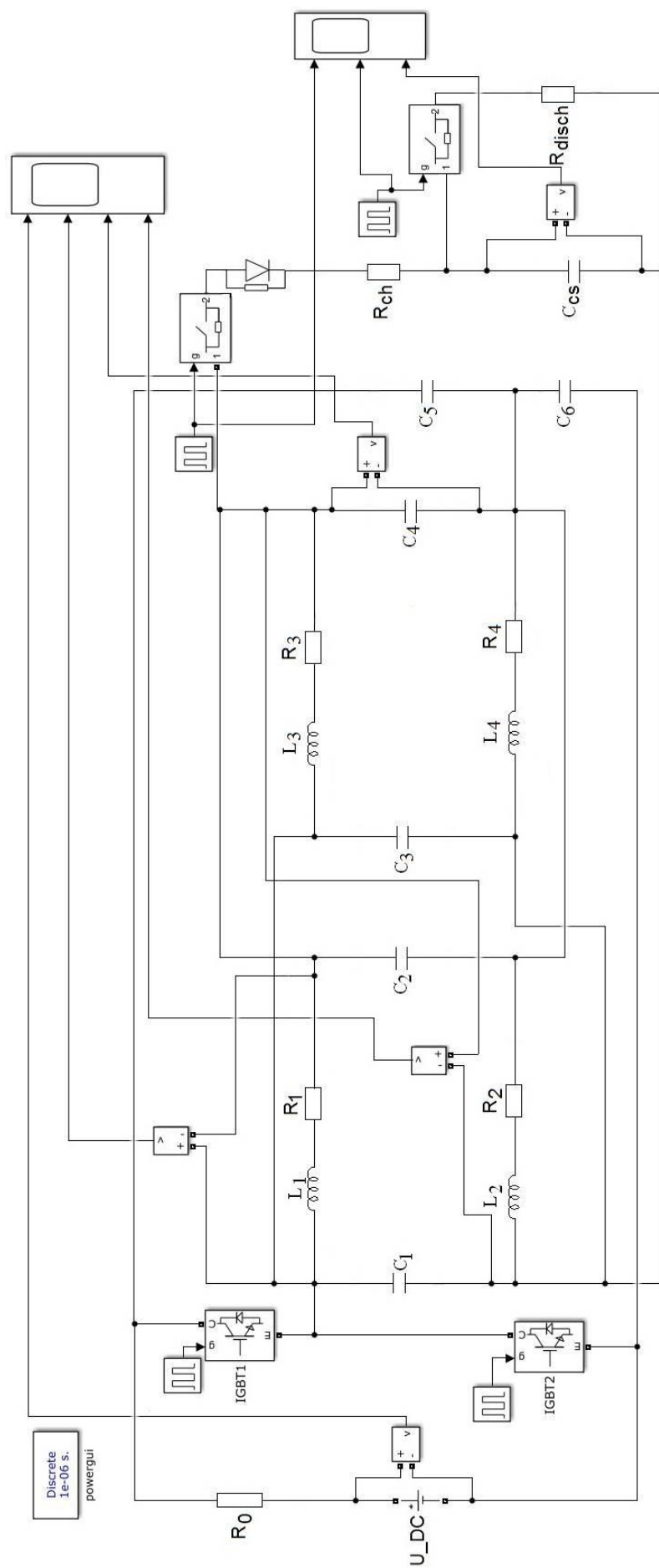


Рисунок 3.35 – Компьютерная модель системы заряда ЕН с ИЭП на основе двухсекционного МИЭК (схема 1)

На рисунке 3.38 приведены графики напряжения в диагонали инвертора (амплитудой 12,95 кВ). На рисунке 3.39 показан график перезаряда ЕН (емкостью 15,5 мкФ, сопротивление резистора в цепи заряда равно 500 Ом) на активную нагрузку (резистор сопротивлением 345 Ом). Из графика видно, что ЕН заряжается до уровня напряжения в 12 кВ, что в 22,2 раза превышающего напряжение источника питания за счет включения ЕН в диагональ полумостовой схемы и резонансного режима работы МИЭК.

На рисунке 3.40 приведены графики напряжения в диагонали инвертора, напряжения на ЕН и тока через ЕН для различных схем ИЕП, приведенных в таблице 3.3.

Выполнены исследования режимов работы схем ИЕП на основе двухсекционного МИЭК. С помощью разработанной модели получены графики напряжений на элементах полумостовой схемы системы заряда ЕН, представленные на рисунках с 3.36 по 3.40.

Схема ИЕП на основе односекционного МИЭК стабилизирует ток нагрузки с коэффициентом отклонения действующего значения тока нагрузки $k = 3,7 \%$.

Схема ИЕП № 2 лучше стабилизирует ток нагрузки (коэффициент отклонения действующего значения тока нагрузки $k = 1,9 \%$), характеризуется более широким диапазоном изменения частоты по сравнению со схемами № 1 и № 3.

Схема ИЕП № 3 характеризуется наибольшим коэффициентом усиления по напряжению по сравнению со схемами № 1 и № 2 ($k_{U3} = 22,2 > k_{U1} = 18,5 > k_{U2} = 14,8$), стабилизирует ток нагрузки с коэффициентом отклонения действующего значения тока нагрузки $k = 3,9 \%$.

Схема ИЕП № 1 занимает промежуточное положение по уровню напряжения на ЕН и степени стабилизации тока нагрузки, стабилизирует ток нагрузки с коэффициентом отклонения действующего значения тока нагрузки $k = 3,5 \%$.

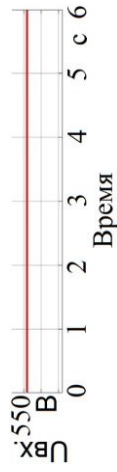
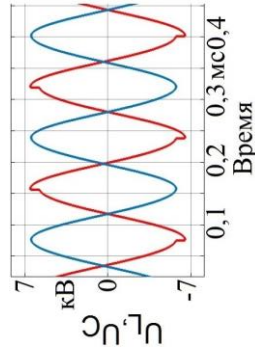
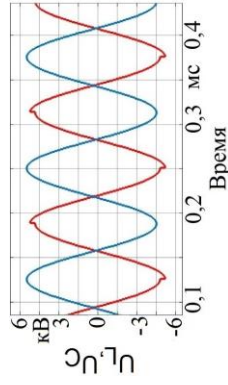


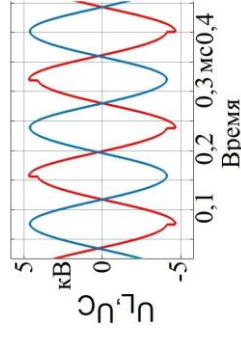
Рисунок 3.36 – Напряжение на входе инвертора



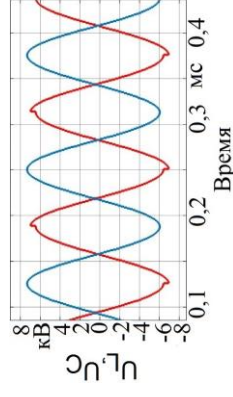
а)



б)



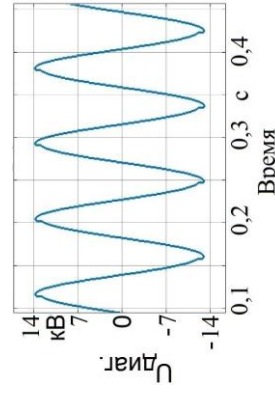
в)



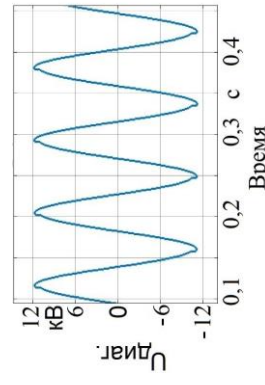
г)

Рисунок 3.37 – Напряжение на обкладке и емкости МИЭК:

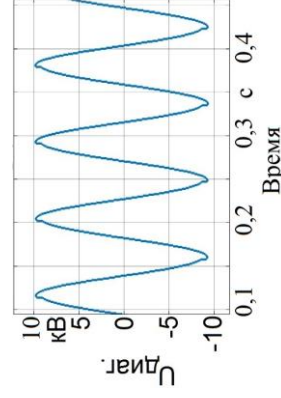
а – для схемы ИЕП на основе односекционного МИЭК; б – для схемы ИЕП № 1 на основе двухсекционного МИЭК;
в – для схемы ИЕП № 2 на основе двухсекционного МИЭК; г – для схемы ИЕП № 3 на основе двухсекционного МИЭК



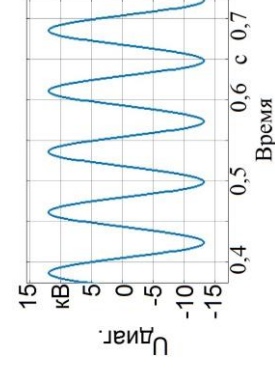
а)



б)



в)



г)

Рисунок 3.38 – Напряжение в диагонали инвертора:

а – для схемы ИЕП на основе односекционного МИЭК; б – для схемы ИЕП № 1 на основе двухсекционного МИЭК;
в – для схемы ИЕП № 2 на основе двухсекционного МИЭК; г – для схемы ИЕП № 3 на основе двухсекционного МИЭК

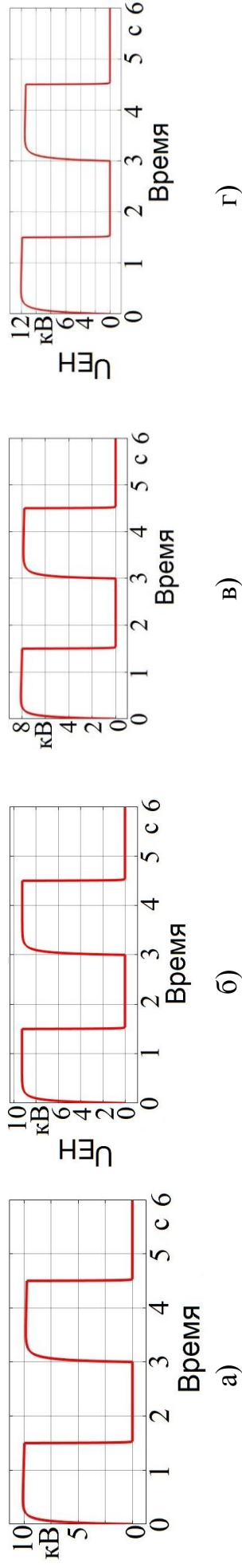


Рисунок 3.39 – Напряжение на ЕН:

а – для схемы ИЕП на основе односекционного МИЭК; б – для схемы ИЕП № 1 на основе двухсекционного МИЭК;
 в – для схемы ИЕП № 2 на основе двухсекционного МИЭК; г – для схемы ИЕП № 3 на основе двухсекционного МИЭК

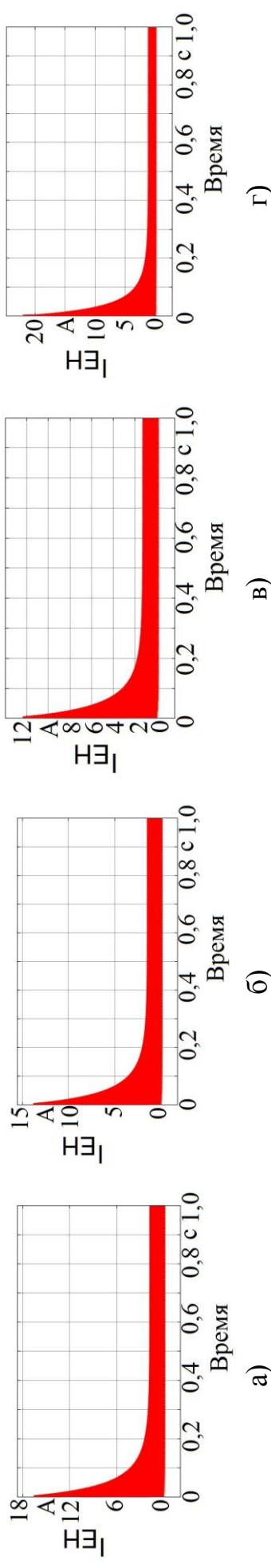


Рисунок 3.40 – Ток через ЕН:

а – для схемы ИЕП на основе односекционного МИЭК; б – для схемы ИЕП № 1 на основе двухсекционного МИЭК;
 в – для схемы ИЕП № 2 на основе двухсекционного МИЭК; г – для схемы ИЕП № 3 на основе двухсекционного МИЭК

Следовательно, применение двухсекционного МИЭК в качестве ИЕП, работающего в составе системы заряда ЕН, позволяет не только получить те же напряжения на ЕН, что и при использовании односекционного МИЭК, но и лучше стабилизировать ток нагрузки с коэффициентом отклонения действующего значения тока нагрузки $k = 1,9 \%$.

Таким образом, доказана энергетическая эффективность и целесообразность создания систем заряда ЕН с ИЕП, выполненных на основе двухсекционных МИЭК, в особенности для систем, где помимо стабилизации тока и значительного повышения напряжения требуется снижение массы и габаритов устройств и ЭМЭ, входящих в состав системы.

3.3.3 Исследование режимов работы многофункциональных интегрированных электромагнитных компонентов в системах заряда емкостных накопителей

Поставлена задача моделирования системы заряда ЕН на базе ИЕП, разработанной в пункте 2.4 главы 4 (рисунок 2.5). Выполним моделирование устройства заряда ЕН электрогидроимпульсной очистительной системы для разряда в скважине с целью повышения нефтеотдачи пласта. За основу схемы устройства заряда выбираем мостовую схему с ИЕП, включенным в диагональ, показанную на рисунке 2.5 [108].

Реализована модель системы заряда ЕН на базе мостовой схемы с ИЕП в среде *Simulink* пакета *MatLab* (рисунок 3.41). Смоделирована и исследована схема заряда ЕН с последующим разрядом на активную нагрузку [58].

Энергия, запасенная в ЕН, определяется по формуле

$$W_C = C \cdot U^2 / 2, \quad (3.1)$$

где C – емкость накопительного конденсатора;

U – напряжение на накопительном конденсаторе.

Емкость накопительного конденсатора находится по (3.1).

Модель системы заряда ЕН:

- трехфазный источник напряжения (*Three-Phase Programmable Voltage Source*) (рисунок 3.42);
- трёхфазный нерегулируемый выпрямитель (*Low-voltage three-phase diode rectifier*) (рисунок 3.43);
- автономный инвертор напряжения (*Single-phase stand-alone voltage inverter*) (рисунки 3.44 и 3.45);
- повышающий трансформатор с коэффициентом трансформации 0,14 (*Transformer*) (рисунок 3.46);
- высоковольтный выпрямитель (в модели находится в составе блока с ЕН – *Capacitive storage with the discharge circuit*) (рисунок 3.47).

Разрядная цепь с ЕН представлена на рисунке 3.48.

Энергия накопительного конденсатора определяется по формуле

$$W_C = P/f_k, \quad (3.2)$$

где P – мощность устройства заряда;

f_k – частота коммутации.

Иначе мощность устройства заряда определяется по формуле

$$P = W_{\text{ИЕП}}/f_p, \quad (3.3)$$

где $W_{\text{ИЕП}}$ – энергия, запасаемая конденсатором ИЕП;

f_p – частота резонансного контура.

Исходя из требуемой энергии, запасаемой устройством, определяется напряжение на ЕН и, следовательно, напряжения на вторичной и первичной обмотках повышающего трансформатора с учетом требуемого коэффициента трансформации.

Исходя из приведенных выше рассуждений, емкость ИЕП находится по (3.1). Индуктивность ИЕП определена, исходя из условия резонанса:

$$\frac{1}{\omega \cdot C} = \omega \cdot L. \quad (3.4)$$

Таким образом, расчет определил значение емкости и индуктивности ИЕП.

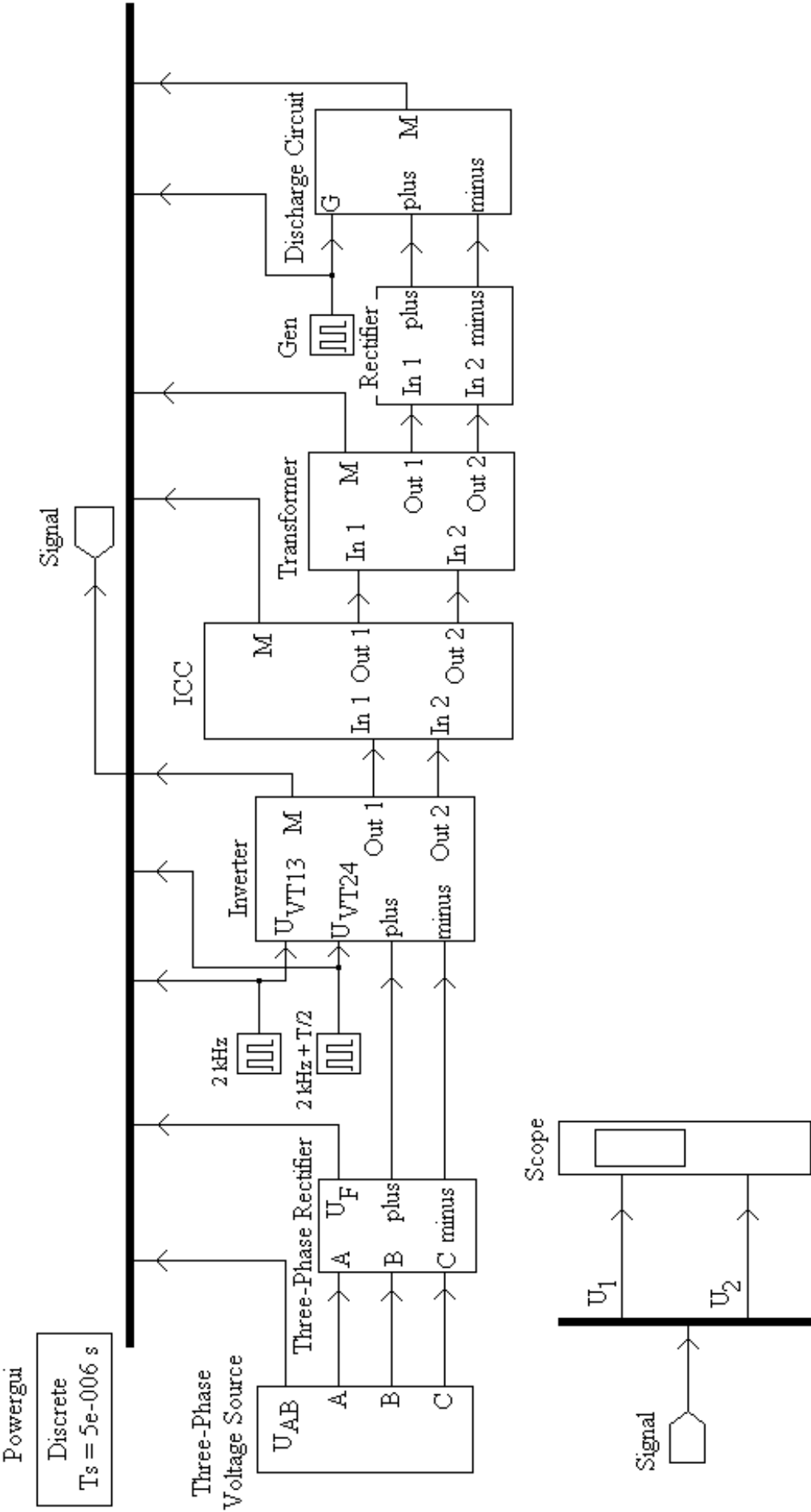


Рисунок 3.41 – Модель системы заряда ЕН

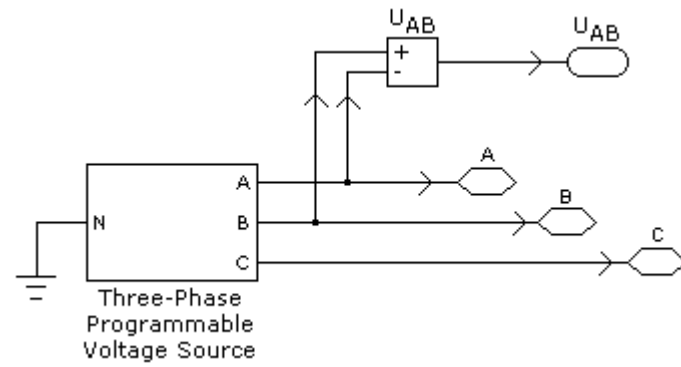


Рисунок 3.42 – Трехфазный источник напряжения

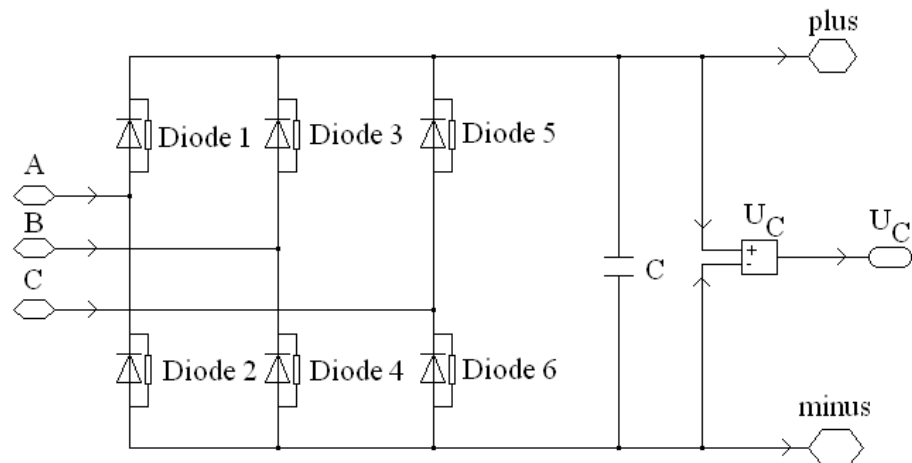


Рисунок 3.43 – Трехфазный выпрямитель

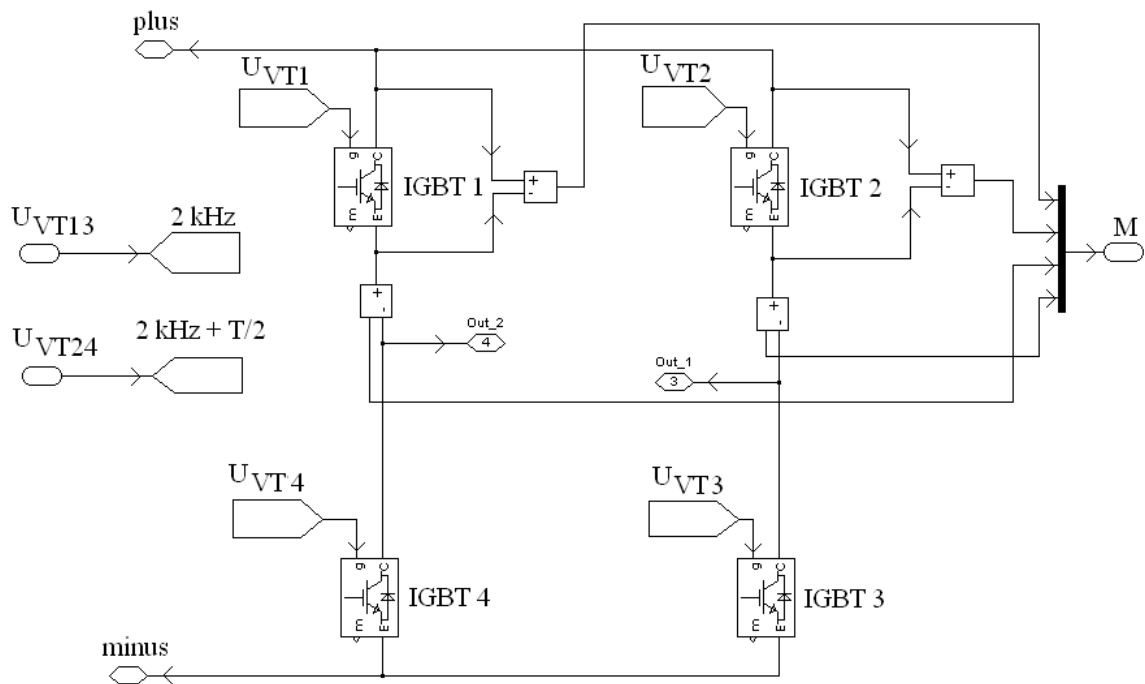


Рисунок 3.44 – Инвертор

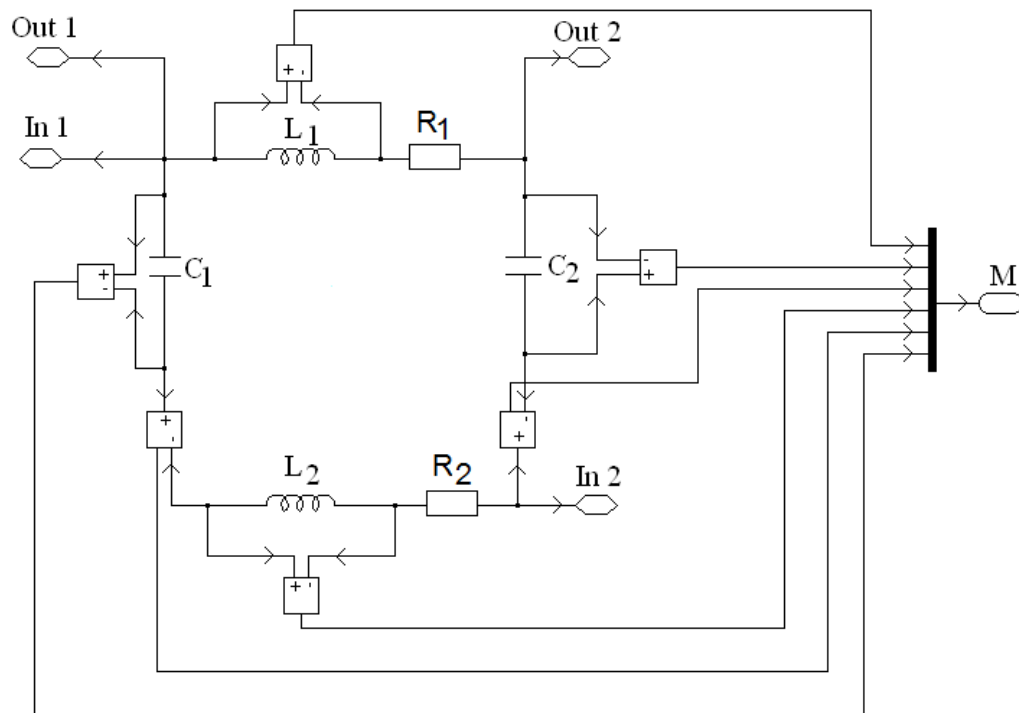


Рисунок 3.45 – Индуктивно-емкостный преобразователь

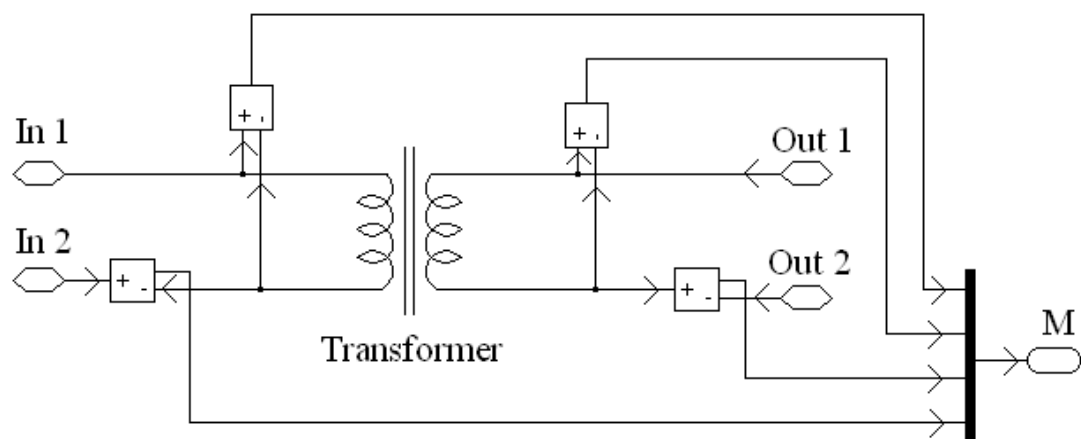


Рисунок 3.46 – Трансформаторный блок

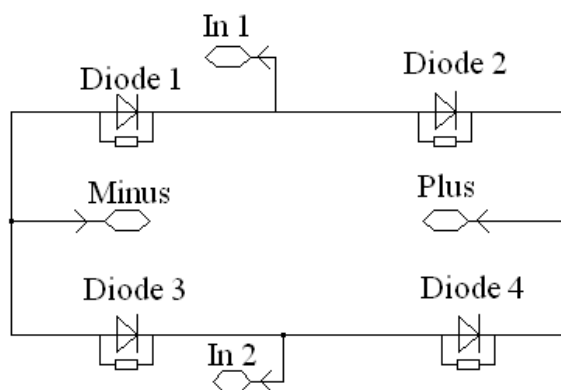


Рисунок 3.47 – Выпрямитель

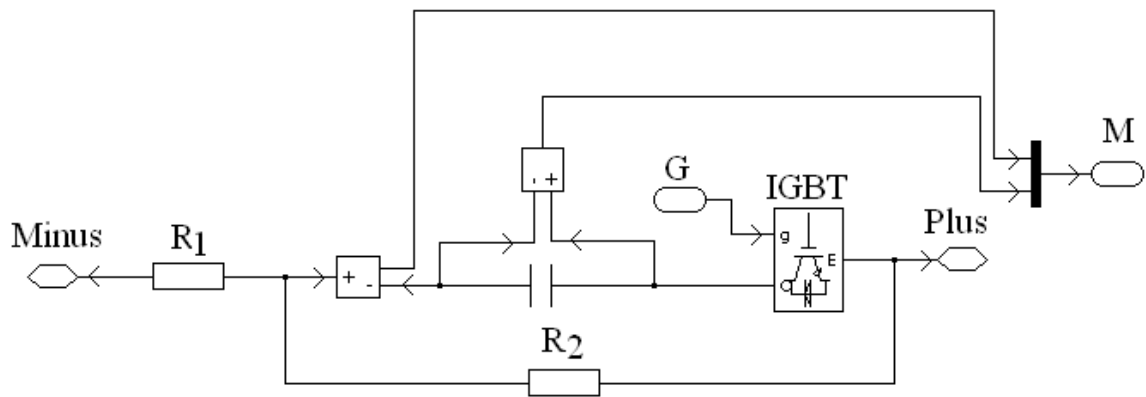


Рисунок 3.48 – Разрядная цепь

В качестве трансформатора используем повышающий трансформатор, первичная обмотка которого подключается параллельно индуктивности ИЭП, а индуктивность при параллельном соединении следует увеличить в два раза для выполнения условия резонанса.

В результате исследования модели получены осциллограммы напряжений и токов на элементах мостовой схемы системы заряда ЕН, представленные на рисунках с 3.49 по 3.52.

Высоковольтный выпрямитель предназначен для преобразования переменного тока в пульсирующий. Такое выпрямление называется двухполупериодным. На выходе выпрямителя формируется пульсирующее напряжение амплитудой 540 В (рисунок 3.49).

На первом и третьем графиках показаны импульсы поочередного отпирания T_1 и запираания T_2 накрест лежащих транзисторов VT_1 , VT_3 и VT_2 , VT_4 . На втором и четвертом графиках приведены напряжения на накрест лежащих транзисторах инвертора (рисунок 3.50). На втором и четвертом графиках наблюдаем прямоугольные импульсы одинаковой полярности (положительные), так как отрицательная полуволна напряжения протекает через диоды [108].

В инверторе напряжения осуществляется преобразование постоянного напряжения в переменное напряжение. На выходе формируется однофазное переменное напряжение.

На рисунке 3.51 показаны графики напряжений и токов на емкостях и индуктивностях ИЕП в квазирезонансном режиме. На первом и пятом графиках показаны напряжения на индуктивностях ИЕП (амплитудой 5 кВ), на третьем и седьмом графиках показаны напряжения на емкостях ИЕП (амплитудой 5 кВ), на втором и шестом – соответственно токи, протекающие через индуктивности ИЕП (амплитудой 5 А), на четвертом и восьмом – соответственно токи, протекающие через емкости ИЕП (амплитудой 5 А).

На рисунке 3.52 на первом и втором графиках показаны напряжение и ток в первичной обмотке трансформатора (амплитудой 5 кВ и 5 А соответственно), на третьем и четвертом – напряжение и ток во вторичной обмотке трансформатора (амплитудой 35 кВ и 0,5 А соответственно), на пятом и шестом – на ЕН (амплитудой 35 кВ и 0,5 А соответственно).

Произведем оценку энергетической эффективности системы заряда ЕН.

Среднециклический КПД системы заряда:

$$\eta_{\text{ср.}} = \frac{W_{\text{н.}}}{W_{\text{н.}} + \Delta W},$$

где $W_{\text{н.}}$ – предразрядная энергия ЕН,

ΔW – энергия потерь.

Определяется предразрядная энергия ЕН:

$$W_{\text{н.}} = C_{\text{н.}} U_{\text{н. max.}}^2 / 2;$$

$$\Delta W = \sum_{k=1}^{k=n} \int_0^{t_u} i_k^2(t) \times R_k dt,$$

где $T_{\text{ц.}}$ – время зарядно-разрядного цикла.

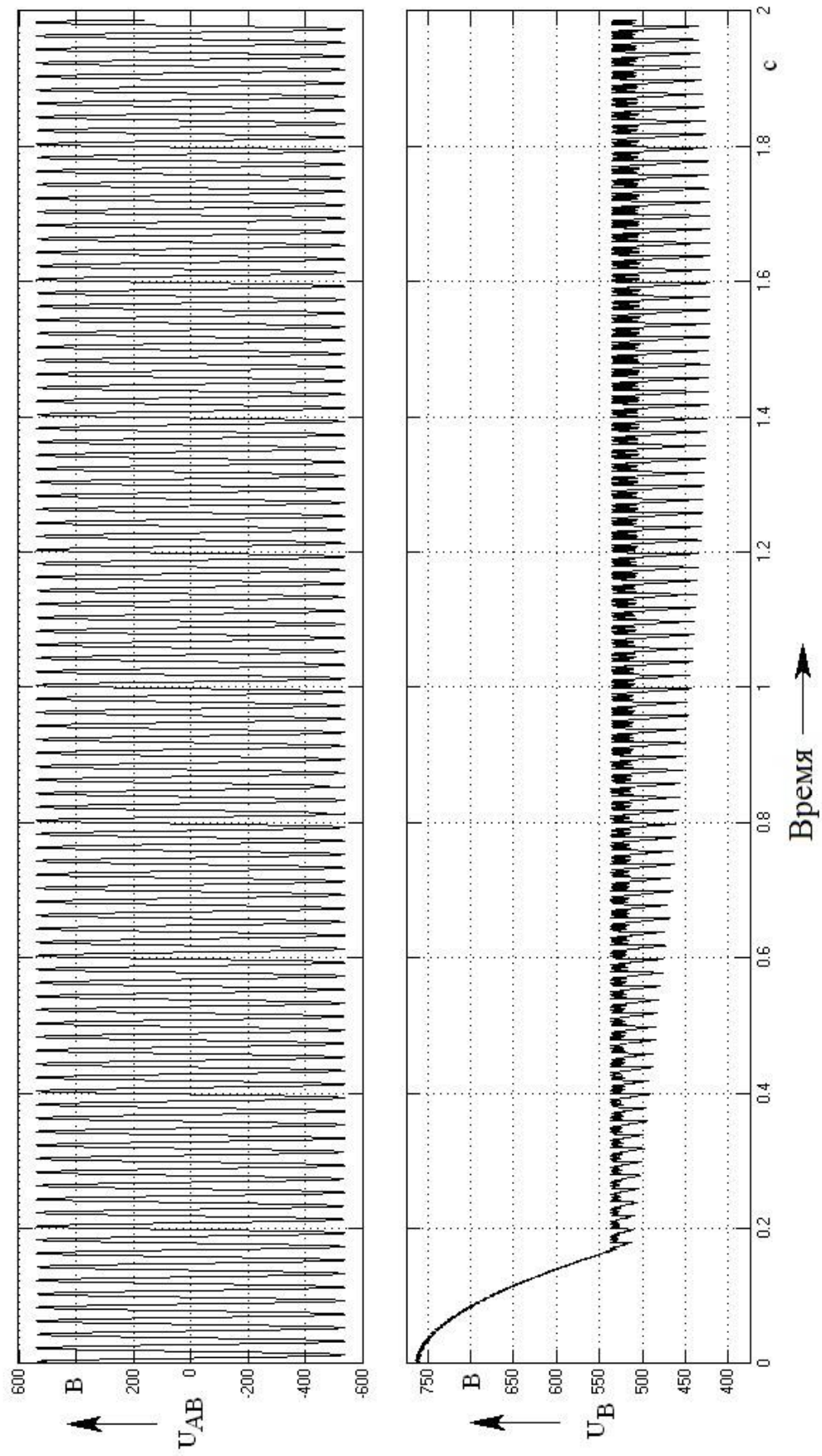


Рисунок 3.49 – Напряжения трехфазного источника и на выходе трехфазного выпрямителя

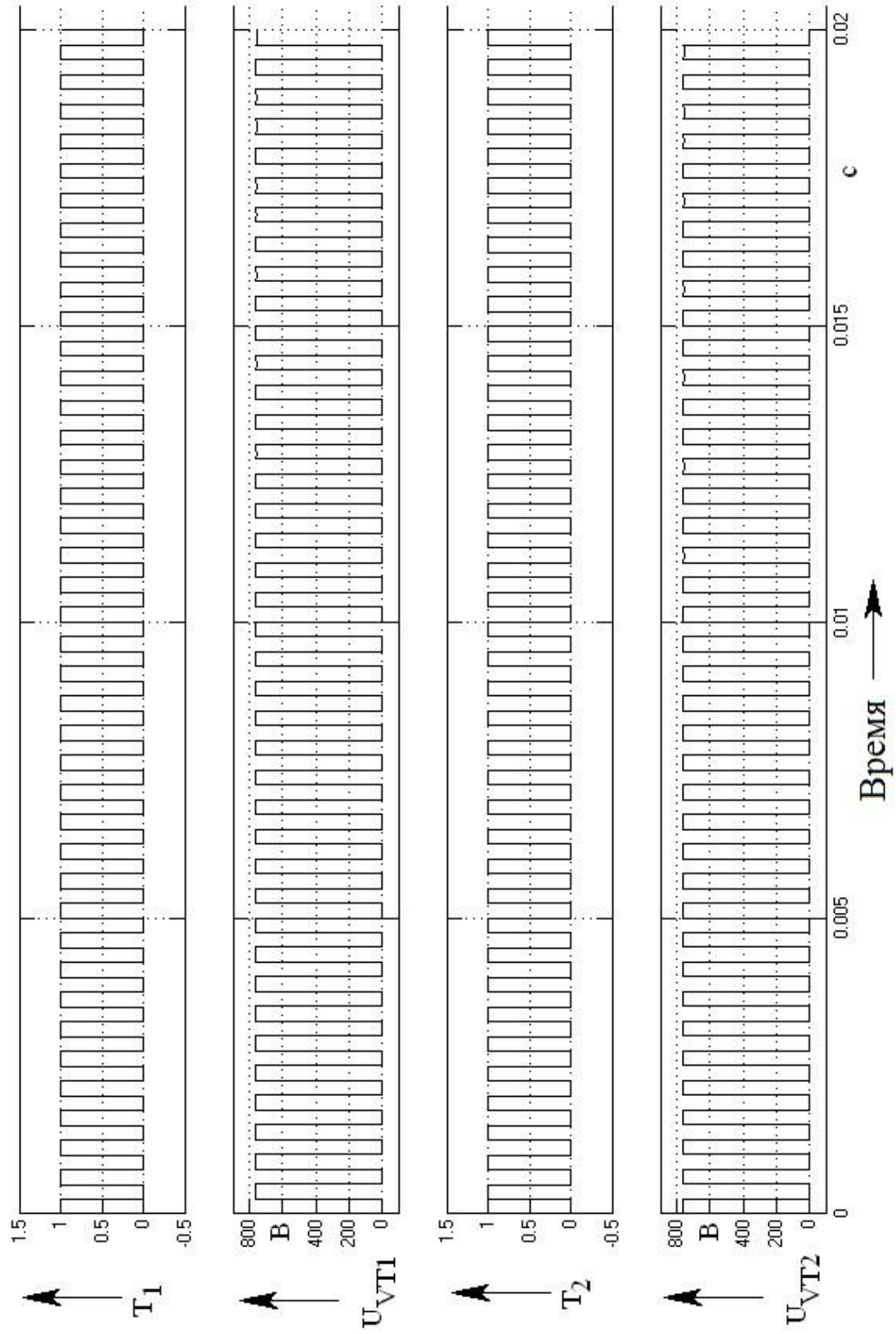


Рисунок 3.50 – Импульсы отпирания и записания транзисторов и напряжений на них

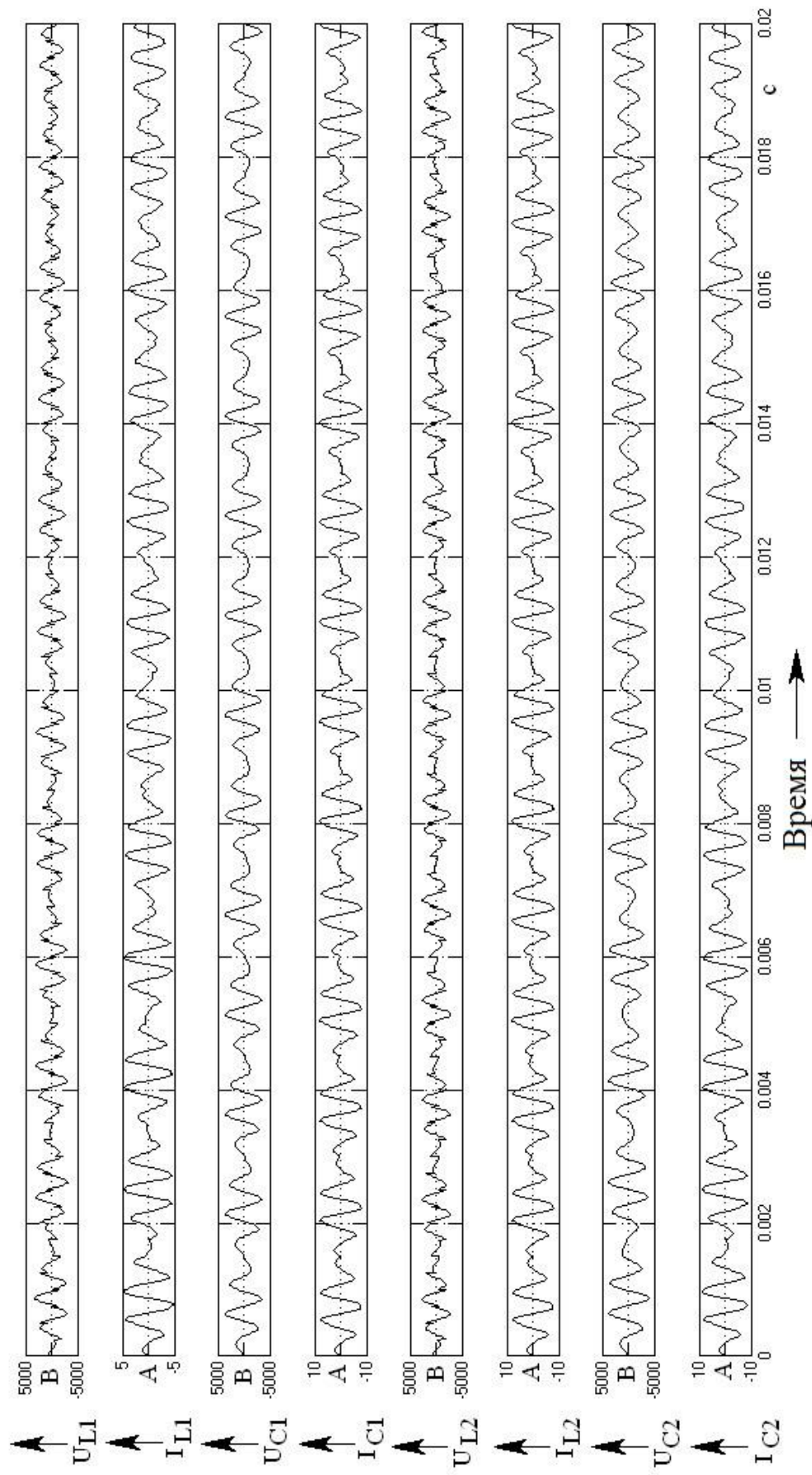


Рисунок 3.51 – Напряжения на емкостях и индуктивностях ИЭП и токи, протекающие через них

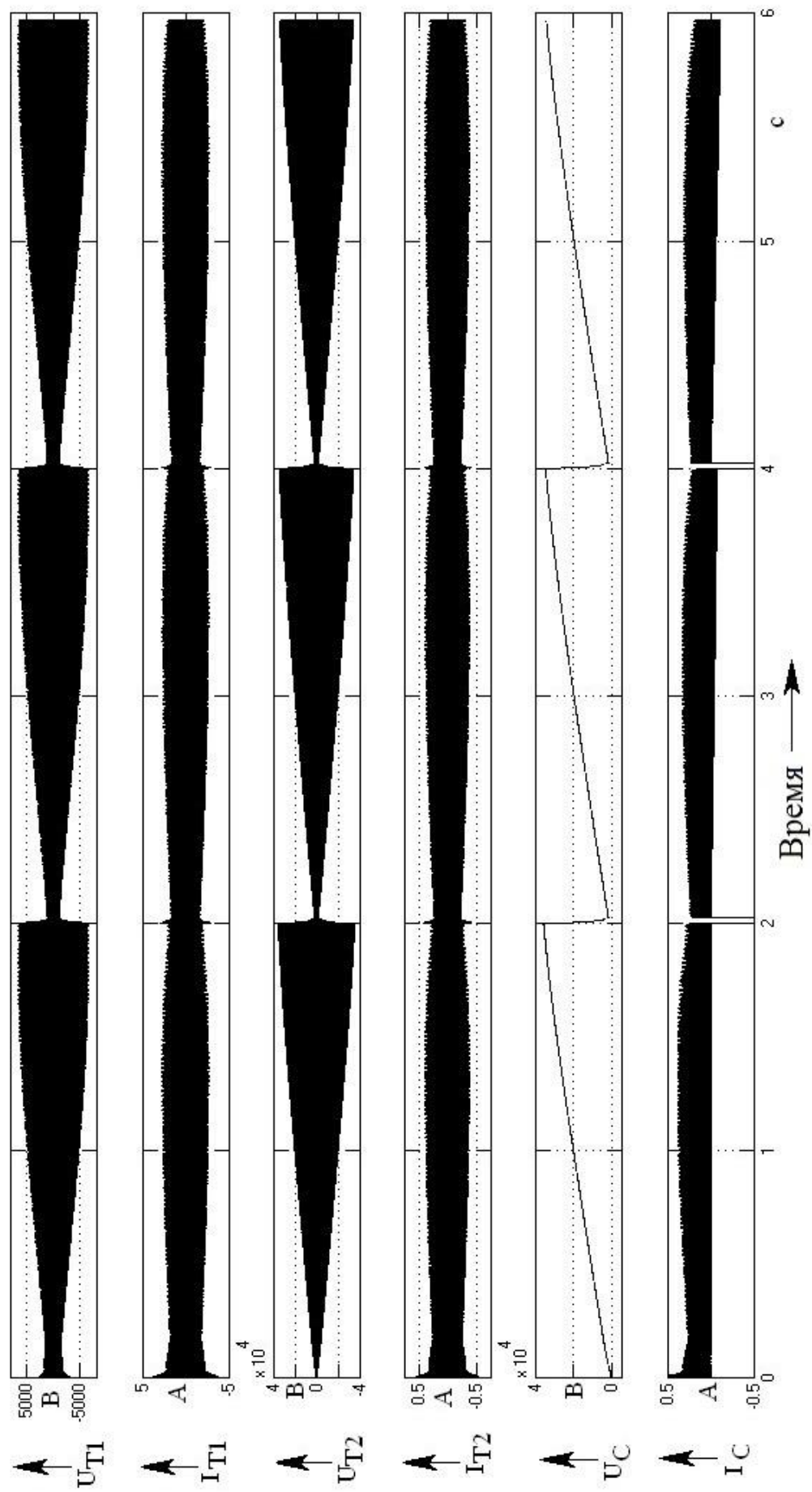


Рисунок 3.52 – Напряжения на первичной и вторичной обмотках трансформатора и ЕН и токи через них

Из уравнения энергетического баланса и при условии минимума потерь КПД входного контура $\eta_{\text{вх}}$ определяется по формуле:

$$\eta_{\text{вх.}} = \frac{\frac{1}{2} + \sqrt{\frac{1}{4} - \frac{P_{\text{с.}} \cdot K_{\text{ф.вх.}}^2}{2 \cdot P_{\text{ист.}}} \cdot \left(1 + \frac{2 \cdot R_3 \cdot C}{t_3} \cdot K_{\text{ф.з.}}^2\right)}}{1 + \frac{2 \cdot R_3 \cdot C}{t_3} \cdot K_{\text{ф.з.}}^2},$$

где $P_{\text{ист.}}$ – максимальная входная мощность;

t_3 – время заряда;

R_3 – сопротивление, учитывающее потери в зарядном контуре.

$$P_{\text{с.}} = U^2 \cdot \frac{C}{2} \cdot t_3.$$

Можно сделать вывод, что ИЕП преобразует источник напряжения в источник тока.

По результатам моделирования получены осциллограммы токов и напряжений на всех узлах источника вторичного электропитания. С помощью разработанной модели произведен выбор наиболее эффективного схемотехнического решения с использованием ИЕП для построения на его основе силовой части системы заряда ЕН [20, 125 – 128]. Показано, что режим работы системы заряда ЕН постоянным током повышает КПД с 48 до 95 % (рисунок 3.53) [108].

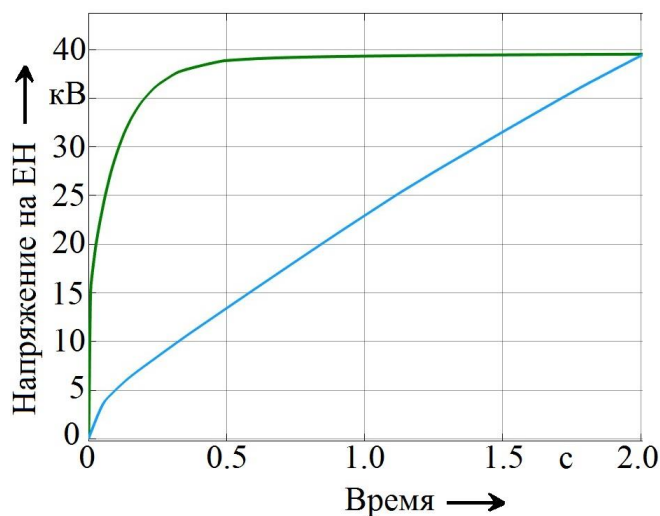


Рисунок 3.53 – Напряжения на ЕН для разных режимов заряда:

1 – при неизменной форме тока; 2 – при изменяющейся форме тока

Таким образом, разработанная компьютерная модель в среде *MathCad* позволяет осуществить выбор наиболее эффективного схемотехнического решения ИЕП для систем заряда ЕН.

3.3.4 Исследование режимов работы многофункциональных интегрированных электромагнитных компонентов в двухтактных преобразователях, работающих в составе индукционных нагревательных систем

В двухтактных преобразователях, в отличие от одноктактных, используются обе части цикла преобразования (зарядная и разрядная), что повышает их КПД. Преобразователи, собранные по двухтактной схеме, успешно используются в зарядных устройствах модульной конструкции, в системах автоматического контроля и заряда аккумуляторных батарей, импульсной технике, применяются для питания различных радиотехнических устройств, в источниках вторичного электропитания и преобразовательной технике. Двухтактные преобразователи с дросселем переменного тока применяются в качестве сварочного инвертора [129].

Для повышения КПД, снижения массы и габаритов двухтактных преобразователей предлагается использовать гибридный ЭМЭ – МИЭК [7, 60].

Разработаны и запатентованы различные электротехнические устройства на базе МИЭК, работающем в составе двухтактного преобразователя, на активную нагрузку [49, 83, 84, 104, 107, 108].

Применение гибридных ЭМЭ позволяет улучшить технико-экономические показатели, ускорить процесс разработки, повысить технологичность и надежность, снизить себестоимость устройств на их основе [65, 130, 131].

При разработке методик расчета МИЭК и их уточнении, а также при определении алгоритмов проектирования устройств на основе МИЭК необходимо учитывать режимы работы компонента, ЭМП, происходящие в нём. Следовательно, анализ режимов работы МИЭК в составе двухтактного инвертора, является актуальной научной задачей.

Многофункциональные интегрированные электромагнитные компоненты выполняют роль ИЕП в двухтактных преобразователях. Выполним исследование режимов работы МИЭК в составе инвертора.

Длительная работа оборудования на импульсном напряжении приводит к ускоренному износу и отказу техники. Использование напряжения искаженной формы для питания дорогостоящего оборудования нежелательно. Определенные категории оборудования не способны работать на напряжении, отличающемся от синусоиды. Возникает необходимость в инверторах с синусоидальной формой напряжения, способных выдержать значительную нагрузку. Производители предлагают преобразователи с квазисинусоидальной формой напряжения. Такая форма представляет собой синусоиду, состоящую из множества небольших ступенек. Получить идеальную синусоиду при использовании радиоэлектронных компонентов достаточно сложно. Проблема решается установкой фильтра, что, в свою очередь, значительно повышает массу и габариты преобразователя, усложняет схему, увеличивает стоимость, снижает надежность. Получить синусоидальную форму тока в цепи питания инверторных систем, а также обеспечить высокий коэффициент мощности (до 98 %), близкий к идеальному, за счет минимального сдвига фаз между напряжением и током (вследствие активного характера нагрузки) можно в устройствах, содержащих колебательные контуры. Поэтому выбор параметров МИЭК для работы в составе двухтактного инвертора произведем исходя из условия, при котором процессы носят колебательный характер [20, 54, 107].

Основными задачами исследования являются анализ режимов работы односекционной структуры МИЭК и расчет ЭМП в двухтактных преобразователях с ИЕП на базе МИЭК.

Схема двухтактного преобразователя на базе односекционного МИЭК показана на рисунке 3.54. Рассмотрим установившийся режим работы преобразователя. Происходит заряд МИЭК через индуктивность его обкладок. В момент t ключ k_1 размыкается, ключ k_2 замыкается. Напряжение на емкости

МИЭК изменяет полярность на обратную. Происходит разряд емкости МИЭК на активную нагрузку.

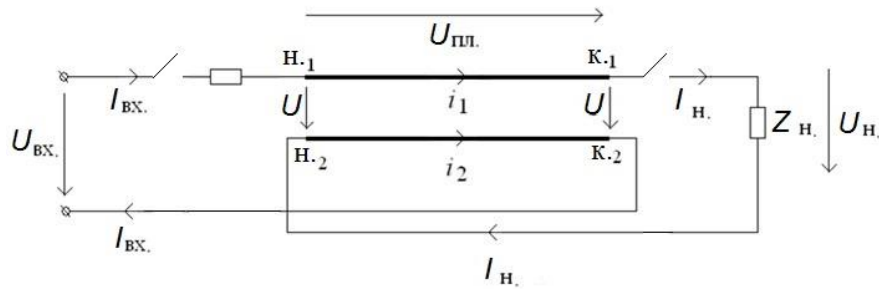


Рисунок 3.54 – Схема замещения односекционного МИЭК с интегральными параметрами в двухтактном преобразователе

Разработана математическая модель двухтактного преобразователя на базе односекционного МИЭК, схема замещения которого представлена на рисунке 3.54, для определения диапазона изменения напряжения на емкости от входного напряжения, при котором осуществляется заряд емкости МИЭК с максимальным КПД, оценки коэффициента усиления по напряжению при построении электротехнических устройств. Сопротивление нагрузки приведено к цепи МИЭК.

Система уравнений, описывающая процессы заряда и разряда емкости МИЭК в среде *MathCad*:

$$\begin{cases} \underline{U}_{\text{BX.}} = \underline{U}_{\text{пл.1}} + \underline{U}, \\ \underline{U} = \frac{\underline{I}_{\text{BX.}} - \underline{I}_{\text{H.}}}{j \cdot \omega \cdot C}, \\ \underline{U}_{\text{пл.}} = (R + j \cdot \omega \cdot (L + M)) \cdot (\underline{I}_{\text{BX.}} + \underline{I}_{\text{H.}}), \\ \underline{U}_1 + \underline{U}_{\text{пл.}} = \underline{U}, \\ \underline{u} = \underline{u}_R + \underline{u}_L + \underline{u}_C = \underline{i} \cdot R + L \cdot \frac{d\underline{i}}{dt} + \underline{u}_C, \\ \underline{i}_C = C \cdot \frac{d\underline{u}_C}{dt}. \end{cases}$$

Рассмотрим расчет ЭМП (напряжения и тока на емкости МИЭК) односекционного МИЭК, представленного на рисунке 3.54. Осуществим расчет емкости МИЭК для достижения максимального коэффициента усиления по напряжению для заданных значений напряжения питания $u_{\text{BX.}}$, индуктивности L и

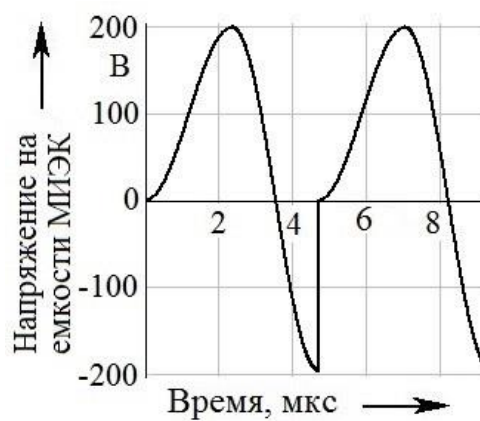
активного сопротивления R обкладок МИЭК. Частота определяется параметрами колебательного контура. При заданных исходных значениях напряжения питания $u_{вх.}$, индуктивности L и активного сопротивления R обкладок МИЭК определим емкость МИЭК для получения формы тока, близкой к синусоидальной, и максимального коэффициента мощности.

При соотношении параметров МИЭК получаем апериодический заряд, который позволяет зарядить емкость МИЭК только до уровня напряжения питания. При выполнении условия процессы носят колебательный характер. При включении ключа k_1 проходит полуволна тока, и емкость обкладок МИЭК заряжается. После перехода тока через ноль ключ k_1 запирается. При включении ключа k_2 ток проходит в противоположном направлении, емкость МИЭК перезаряжается, и ключ k_2 запирается.

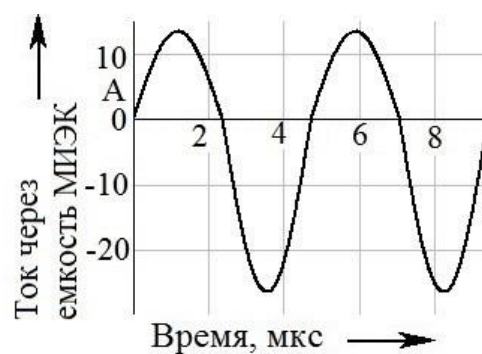
На рисунке 3.55 показаны графики зависимости напряжения на емкости МИЭК и тока в обкладках МИЭК от времени при колебательном процессе заряда емкости МИЭК. Из графика видно, что в случае заряда через индуктивность емкость МИЭК заряжается до уровня напряжения, большего, чем напряжения питания (с коэффициентом 2). Следовательно, диапазон изменения увеличения напряжения на емкости от входного напряжения составляет от 1 до 2.

Математическая модель позволяет определить максимальное значение напряжения на емкости, которое достигается, например, при следующем сочетании параметров МИЭК. Таким образом, получаем максимальный коэффициент усиления по напряжению (равный двум) при работе односекционного МИЭК в двухтактном преобразователе.

Для достижения высокого значения коэффициента мощности (до 0,98) требуется получить максимально приближенную к синусоидальной форму тока инвертора, что достигается, например, в случае апериодического заряда емкости МИЭК при следующем сочетании параметров компонента: $L = 5,6 \text{ мкГн}$, $C = 0,245 \text{ мкФ}$, $R = 31 \text{ мОм}$ [132].



а)

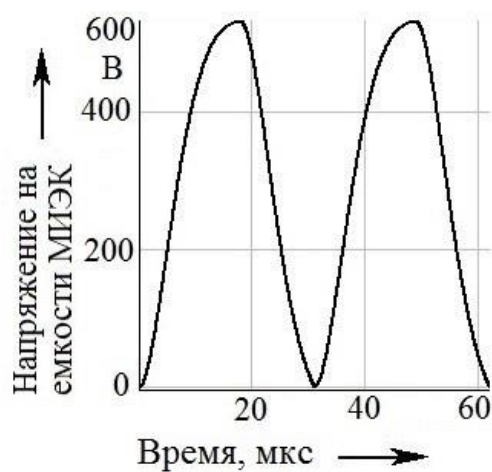


б)

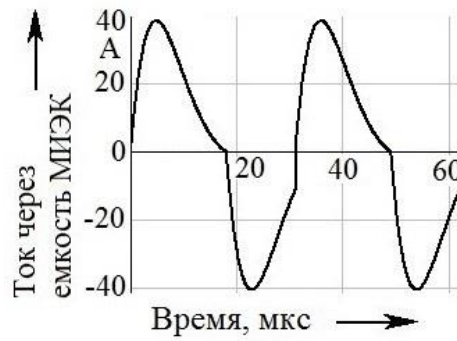
Рисунок 3.55 – Напряжение на емкости МИЭК и ток в обкладке:

а – напряжение на емкости МИЭК; б – ток, протекающий по обкладке МИЭК

На рисунке 3.56 показаны графики зависимости напряжения на емкости МИЭК и тока в обкладках МИЭК от времени при апериодическом процессе заряда емкости МИЭК.



а)



б)

Рисунок 3.56 – Зависимость напряжения на емкости МИЭК и тока в обкладке МИЭК от времени при апериодическом процессе заряда емкости МИЭК:
а – напряжение на емкости МИЭК; б – ток в обкладке МИЭК

Результаты исследований режимов работы односекционного МИЭК в двухтактном преобразователе, проведенные на основе математической модели МИЭК, показывают, что при колебательном процессе заряда энергия, запасенная в индуктивности обкладок МИЭК, используется при создании импульса большего напряжения, чем входное напряжение; в данном случае при заданных параметрах до $2 \cdot U_{\text{вх}}$ (рисунок 3.56). При апериодическом процессе заряда ток в амплитуде достигает 1,5-кратного значения, а при колебательном процессе ток вдвое меньше, т.е. наблюдается ограничение тока [125, 133]. Напряжение продолжает увеличиваться при снижающемся токе. Следовательно, максимальный коэффициент усиления по напряжению достигается при колебательном процессе заряда емкости МИЭК и коммутации ключа в момент достижения максимального напряжения. Таким образом, получаем такой режим коммутации инвертора, который увеличит напряжение на выходе.

3.4 Оценка надежности многофункциональных интегрированных электромагнитных компонентов

В настоящее время в различных областях электротехники, электромеханики и энергетики широко применяется функциональная интеграция ЭМЭ,

позволяющая улучшить массовые и габаритные показатели, снизить материалоемкость и себестоимость изготовления источника вторичного электропитания, являющихся обязательным функциональным узлом практически любой электронной аппаратуры [9]. Для построения устройств силовой электроники и преобразовательной техники используются МИЭК, отличающиеся от дискретных элементов по конструкции и технологии изготовления, выполняющие функции нескольких ЭМЭ и позволяющие реализовать множество устройств [49, 66, 88].

Трудность математического моделирования МИЭК обусловлена отсутствием достоверных экспериментальных данных о надежности МИЭК, в частности, данных о законах распределения отказов и восстановления, а также невозможностью статических испытаний из-за экономических ограничений. Электромагнитные процессы, происходящие в МИЭК, с точки зрения надежности закономерны. На основании задания и изучения работы сложного компонента составляется алгоритм расчета надежности. Для оценки надежности электромагнитный компонент из-за неоднородности его составляющих может рассматриваться как система.

Для оценки надежности рассмотрим наиболее простую с позиции надежности и функциональности односекционную структуру МИЭК, которая в литературе часто упоминается как «индукон» (индуктивность – конденсатор) [2, 28]. Односекционный МИЭК состоит из каркаса, обкладок из проводящего материала, свернутых в спираль, разделенных диэлектриком. При отказе любого элемента наступает отказ системы. Отказ односекционного МИЭК может происходить по двум основным причинам: во-первых, старение (разрушение) изоляции и/или проводящего материала, во-вторых, повреждение выводов в начале и в конце обкладки. Поэтому для односекционного МИЭК возможны три состояния: работоспособное, отказ по причине старения изоляции и/или разрушения проводящего материала, отказ по причине повреждения выводов проводящих обкладок.

Оценить надежность сложного компонента технической системы можно только семейством критериев, которые совокупно характеризуют надежность компонента. Многофункциональный интегрированный электромагнитный компонент является невосстанавливаемым объектом, в то время, как устройства на основе МИЭК являются восстанавливаемыми объектами, работоспособность которых может быть восстановлена путем замены поврежденного (вышедшего из строя) элемента.

Расчет показателей надежности целесообразно выполнять при помощи электронных таблиц программы *Excel*. В таблицу заносятся все элементы устройства, включая монтажные.

Показатели надежности системы вычисляются по формулам:

$$P_c(t) = \prod_{j=1}^n P_j(t),$$

$$T_{1c} = \int_0^{\infty} P_c(t) dt,$$

$$\lambda_c(t) = \sum_{j=1}^n \lambda_j(t),$$

$$f_c(t) = f_1(t) \cdot P_2(t) \dots P_n(t) + P_1(t) \cdot f_2(t) \dots P_n(t) + \dots + P_1(t) \cdot P_2(t) \dots f_n(t),$$

где $P_j(t)$ – вероятность безотказной работы j -го элемента, $j = 1, 2, \dots, n$;

$f_j(t)$ – плотность распределения времени до отказа j -го элемента, $j = 1, 2, \dots, n$;

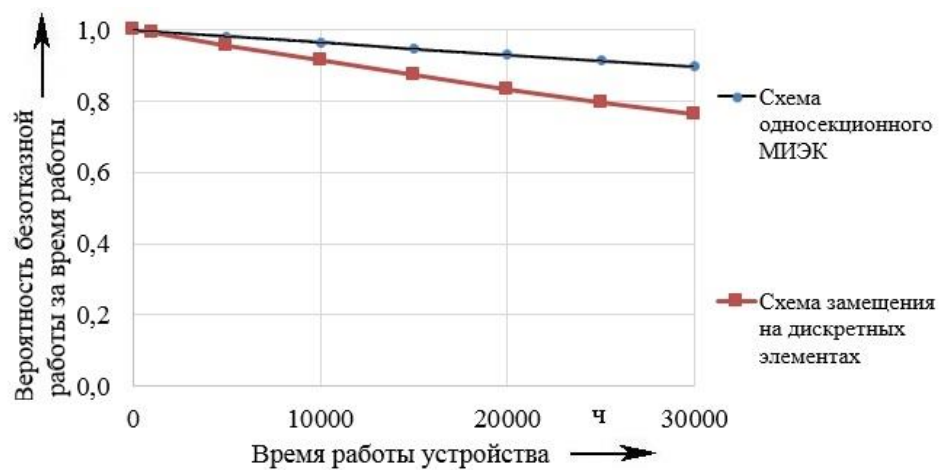
$\lambda_j(t)$ – интенсивность отказа j -го элемента, $j = 1, 2, \dots, n$.

В [92] показано, что схема замещения на дискретных элементах эквивалентна с точки зрения ЭМП интегрированной структуре МИЭК [58]. Рассмотрим схему замещения односекционного МИЭК на дискретных компонентах (рисунок 3.2), представляющую собой параллельное соединение двух *RLC*-контуров. Принимается, что электрические и температурные режимы работы, базовые коэффициенты надежности и условия эксплуатации одинаковы в обоих случаях. Показатели надежности схемы замещения односекционного МИЭК на дискретных элементах приведены в таблице 3.4 и на рисунке 3.57.

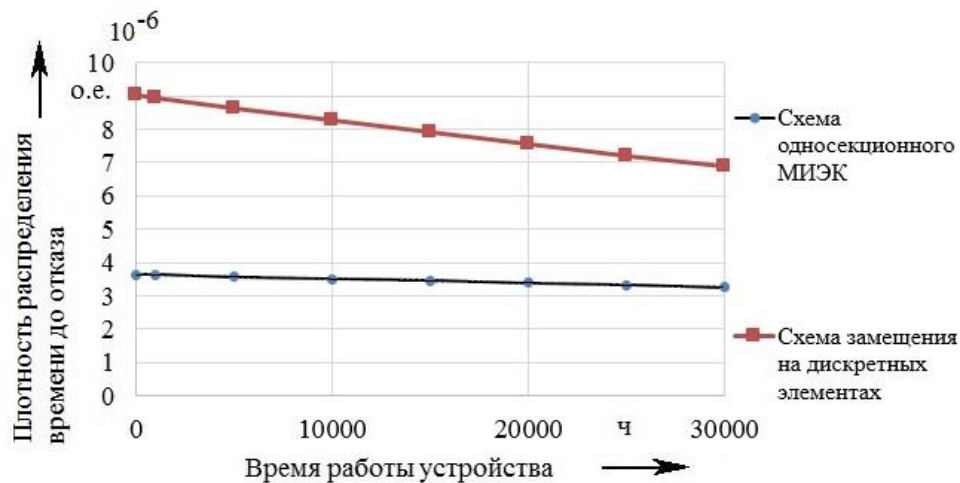
Таблица 3.4 – Интенсивности отказов элементов, составляющих односекционный МИЭК

Элементы	Количество, n	$\lambda \cdot 10^{-5}$, час ⁻¹	$n \cdot \lambda \cdot 10^{-5}$, час ⁻¹
<i>Интенсивности отказов элементов, составляющих односекционный МИЭК</i>			
Проводящие обкладки, разделенные диэлектриком	2	0,08	0,16
Электрические выводы, расположенные в начале и конце проводящих обкладок (разъемы коаксиальные)	4	0,021	0,084
Пайки	8	0,01	0,08
Печатные проводники	4	0,01	0,04
<i>Интенсивности отказов элементов, составляющих схему замещения МИЭК</i>			
Конденсаторы	2	0,15	0,3
Катушки индуктивности	2	0,075	0,15
Резисторы	2	0,075	0,15
Электрические выводы (разъемы коаксиальные)	4	0,021	0,084
Пайки	16	0,01	0,16
Печатные проводники	6	0,01	0,06

В зависимости от структуры МИЭК выполняет различные функции: накопление (аккумулирование) электрической (выполняет роль конденсатора, зарядной/разрядной емкости, емкости нагрузки) и магнитной (выполняет роль катушки индуктивности) энергии, трансформации энергии (первичной и/или вторичной обмотки трансформатора). Для оценки надежности технических систем, предназначенных для выполнения нескольких функций, требуется определить вероятность безотказной работы системы по каждой функции. При этом для каждой функции необходимо составить свою структурную схему надежности. Возникает необходимость декомпозиции МИЭК как функциональной системы по выполняемым функциям. По сложности функции делятся на простые, которые рассматриваются как неразложимые составляющие, и составные, состоящие из нескольких простых и объединенные по общности цели, роли в процессе функционирования.



а)



б)

Рисунок 3.57 – Показатели надежности односекционного МИЭК

и его схемы замещения на дискретных элементах:

а – вероятность безотказной работы;

б – плотность распределения времени до отказа

Односекционный МИЭК выполняет простые функции накопителя электрической (за счет наличия двух проводящих обкладок, разделенных диэлектриком) и магнитной энергии (за счет наличия проводящего материала, свернутого в спираль) и составную функцию последовательного RLC -контура.

Результаты расчета показателей надежности односекционного МИЭК и его схемы замещения представлены в таблице 3.5.

Таблица 3.5 – Показатели надежности односекционного МИЭК и его схемы замещения на дискретных компонентах

Показатели надежности	Схема замещения на дискретных элементах	Схема односекционного МИЭК
Интенсивность потока отказов, λ , 1/ч	$9,04 \cdot 10^{-6}$	$3,64 \cdot 10^{-6}$
Среднее время наработки на отказ, $T_{1.}$, ч	110 619	274 725
Вероятность (заданная) наработки на отказ, P	0,90	0,90
Время наработки на отказ с заданной вероятностью, t , ч	11 062	27 473
Время работы устройства, T_p , ч	30 000	30 000
Вероятность безотказной работы за время работы, P_t	0,76	0,90

Выполнена оценка надежности простой структуры односекционного МИЭК [130, 131]. Однако компоненты имеют более сложные структуры, значительно расширяющиеся области их применения в электротехнических устройствах [58]. Поэтому возникает необходимость произвести расчеты параметров надежности более сложных структур МИЭК.

Поставлена задача оценки показателей надежности более сложных структур МИЭК [130]. Рассмотрены различные структуры и схемы замещения различных схемотехнических исполнений МИЭК (рисунок 3.58). Приближенный расчет показателей надежности выполнен при помощи электронных таблиц программы *Excel*. Учитываются все элементы, включая монтажные. Интенсивности отказов элементов, составляющих МИЭК, приведены в таблицах 3.6 и 3.7.

Таблица 3.6 – Интенсивности отказов элементов, составляющих различные структуры МИЭК

Элементы	Количество	$\lambda \cdot 10^{-5}$, час ⁻¹
Проводящие обкладки, разделенные диэлектриком	$n + 1$	0,08
Электрические выводы, расположенные в начале и конце проводящих обкладок (разъемы коаксиальные)	$2 \cdot (n + 1)$	0,021
Пайки	$4 \cdot (n + 1)$	0,01
Печатные проводники	$2 \cdot (n + 1)$	0,01

Таблица 3.7 – Интенсивности отказов элементов, составляющих схемы замещения различных структур МИЭК

Элементы	Количество	$\lambda \cdot 10^{-5}$, час ⁻¹
Конденсаторы	$2 \cdot n$	0,15
Катушки индуктивности	$2 \cdot n$	0,075
Резисторы	$2 \cdot n$	0,075
Электрические выводы (разъемы коаксиальные)	$2 \cdot (n + 1)$	0,021
Пайки	$2 \cdot (7 \cdot n + 1)$	0,01
Печатные проводники	$6 \cdot n$	0,01

Рассмотрим односекционный МИЭК, представленный на рисунке 3.58, а, с точки зрения выполняемых им функций.

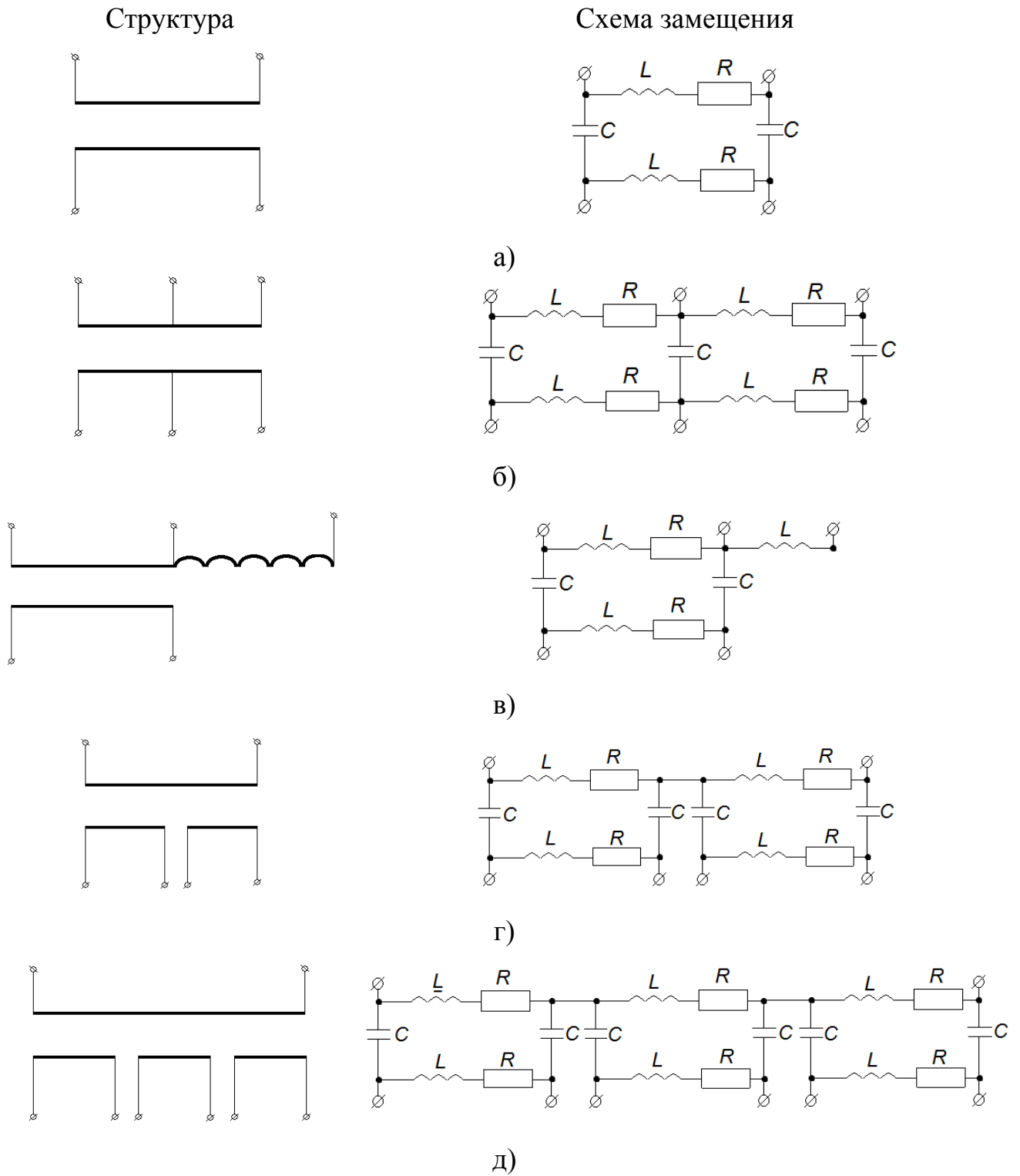


Рисунок 3.58 – Структуры и схемы замещения МИЭК:

а – односекционный МИЭК; б – односекционный МИЭК с выводами в середине каждой из проводящих обкладок; в – односекционный МИЭК с дополнительной обмоткой, соединенной последовательно с одной из проводящих обкладок; г – двухсекционный МИЭК; д – трехсекционный МИЭК

Односекционный МИЭК выполняет простые функции катушки индуктивности (за счет наличия проводящего материала, свернутого в спираль) и конденсатора (за счет наличия двух проводящих обкладок, разделенных диэлектриком) и составные функции последовательного RLC -контура. Если добавить по одному выводу в середину каждой проводящей обкладки (рисунок 3.58, б), то односекционный МИЭК сможет выполнять дополнительные простые функции первичной и вторичной обмоток трансформатора и дополнительную составную функцию трансформатора. В случае использования дополнительной обмотки, соединенной последовательно с одной из проводящих обкладок (рисунок 3.58, в), односекционный МИЭК сможет выполнять те же функции, что и схмотехническое решение односекционного МИЭК с выводами в середине каждой из проводящих обкладок.

Двухсекционный МИЭК, представленный на рисунке 3.58, г, выполняет простые функции катушки индуктивности и конденсатора в зарядной и разрядной цепи, первичной и вторичной обмоток трансформатора и составные функции последовательного RLC -контура и трансформатора.

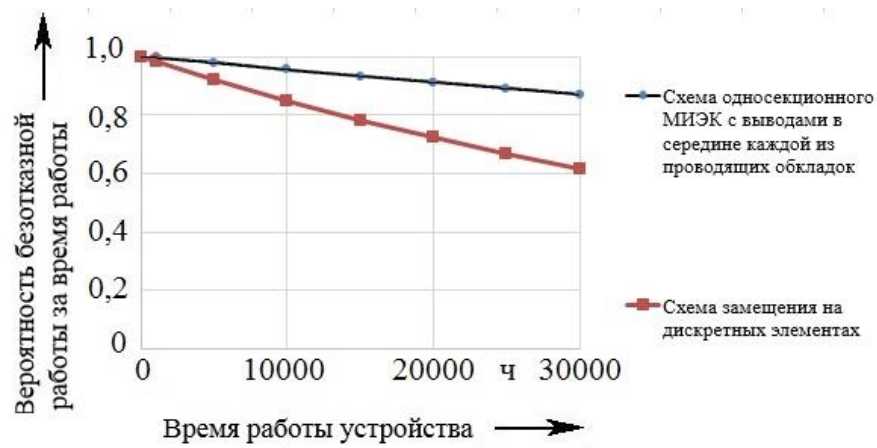
Трехсекционный МИЭК, представленный на рисунке 3.58, д, выполняет простые функции катушки индуктивности и конденсатора в зарядной и разрядной цепи, первичной и вторичной обмоток трансформатора и составные функции последовательного RLC -контура, трансформатора, генератора импульсов напряжения.

Произведем приближенный расчет показателей надежности при помощи электронных таблиц программы *Excel*. Результаты расчета показателей надежности различных структур МИЭК и их схем замещения представлены в таблице 3.8 и на рисунках 3.59 и 3.60.

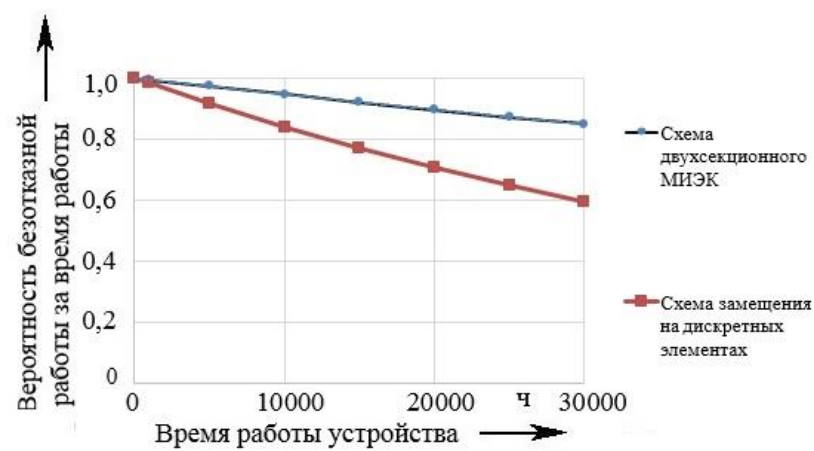
Таблица 3.8 – Показатели надежности различных структур МИЭК

Показатели надежности	Схема замещения на дискретных компонентах	МИЭК
<i>для односекционного МИЭК с выводами в середине каждой из проводящих обкладок</i>		
Интенсивность потока отказов, λ , 1/ч	$16,31 \cdot 10^{-6}$	$4,66 \cdot 10^{-6}$
Среднее время наработки на отказ, T_1 , ч	61 000	215 000
Время наработки на отказ с заданной вероятностью, t , ч	6 000	21 500
Время работы устройства, T_p , ч	30 000	30 000
Вероятность безотказной работы за время работы, P_t	0,61	0,87
<i>для двухсекционного МИЭК</i>		
Интенсивность потока отказов, λ , 1/ч	$17,46 \cdot 10^{-6}$	$5,46 \cdot 10^{-6}$
Среднее время наработки на отказ, T_1 , ч	57 000	183 000
Время наработки на отказ с заданной вероятностью, t , ч	5 700	18 000
Время работы устройства, T_p , ч	30 000	30 000
Вероятность безотказной работы за время работы, P_t	0,59	0,85
<i>для трехсекционного МИЭК</i>		
Интенсивность потока отказов, λ , 1/ч	$25,88 \cdot 10^{-6}$	$7,28 \cdot 10^{-6}$
Среднее время наработки на отказ, T_1 , ч	39 000	137 000
Время наработки на отказ с заданной вероятностью, t , ч	3 800	14 000
Время работы устройства, T_p , ч	30 000	30 000
Вероятность безотказной работы за время работы, P_t	0,46	0,80

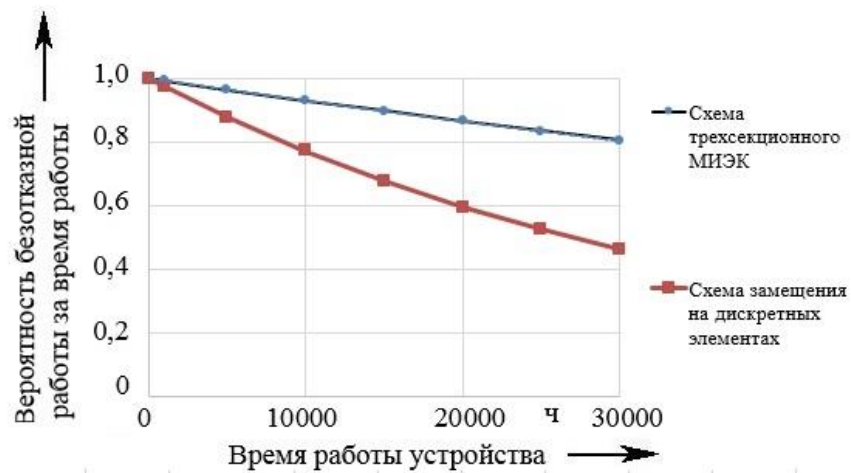
Интегрированное исполнение компонента приводит к снижению интенсивности потока отказов в 1,5 раза, увеличению среднего времени работы компонента и времени безотказной работы с заданной вероятностью в 1,5 раза, увеличению вероятности безотказной работы на 9 % для односекционного МИЭК, на 20 % – для двухсекционного МИЭК, на 17 % – для трехсекционного МИЭК. Надежность трехсекционного гораздо ниже, чем одно- и двухсекционного структуры (29 % и 24 % соответственно), что обусловлено значительным расширением функциональных возможностей: трехсекционный МИЭК, выполняет дополнительную составную функцию генератора импульсов напряжения. Наиболее оптимальной для применения с точки зрения надежности является двухсекционная структура МИЭК. Повышение надежности МИЭК обеспечивается уменьшением числа элементов, отсутствием дополнительных межэлементных и монтажных соединений, паек.



а)



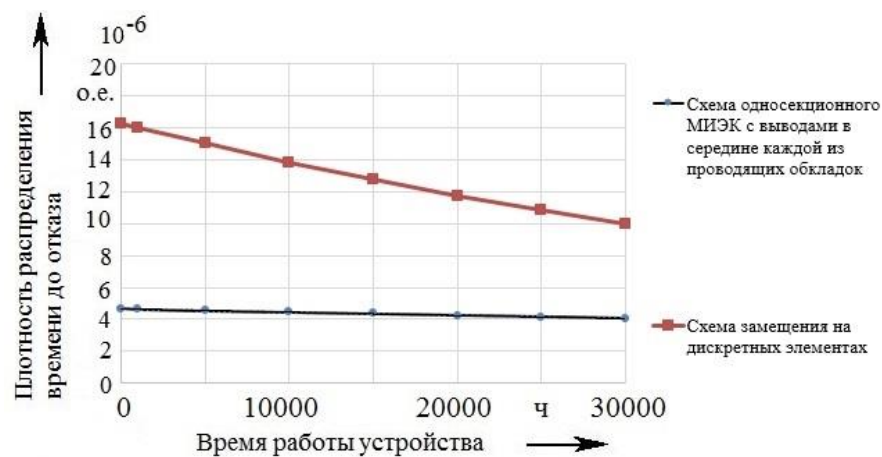
б)



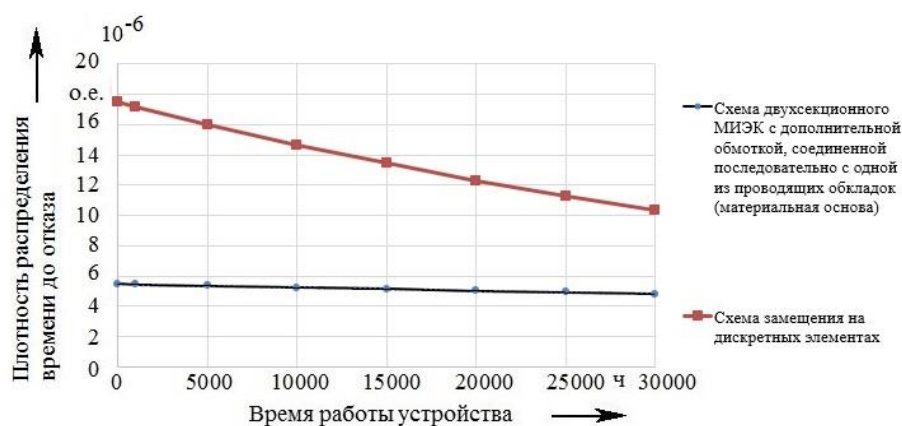
в)

Рисунок 3.59 – Вероятность безотказной работы различных структур МИЭК и их схем замещения на дискретных компонентах:

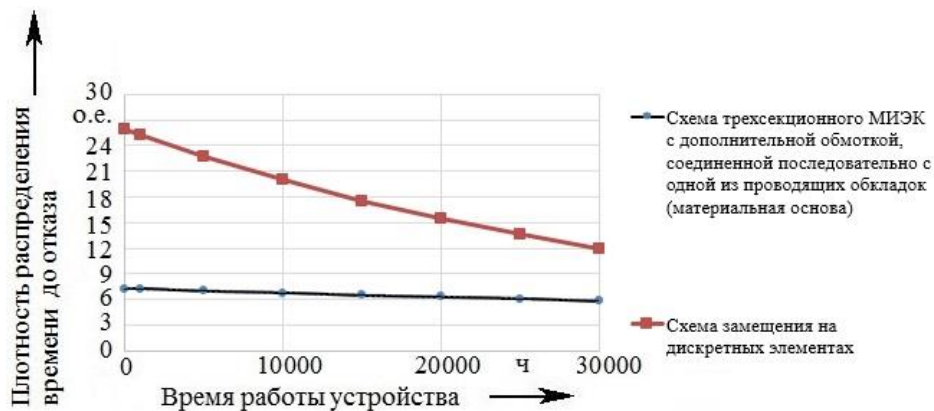
а – для односекционного МИЭК с выводами в середине каждой из проводящих обкладок; б – для трехсекционного МИЭК



а)



б)



в)

Рисунок 3.60 – Плотность распределения времени до отказа различных структур МИЭК и их схем замещения на дискретных ЭМЭ:

- а – для односекционного МИЭК с выводами в середине каждой из проводящих обкладок; б – для двухсекционного МИЭК;
в – для трехсекционного МИЭК

Произведена оценка надежности для различных структур МИЭК и устройств на их основе и предложена программа для ЭВМ для расчета показателей надежности двухсекционных МИЭК в пакете прикладных программ *MathCad*. С помощью разработанной программы получены табличные данные приближенных показателей надежности исследованных структур МИЭК, произведен расчет интенсивности потока отказов, среднего времени наработки на отказ, времени наработки на отказ с заданной вероятностью и работы устройства, вероятности безотказной работы за время работы. Полученные данные можно использовать для оценки надежности различных электротехнических систем и устройств на их основе.

Выводы по главе 3

1. Произведена оценка и определен наиболее простой и точный метод расчета, использующий интегральные параметры МИЭК. Применение данного метода расчета возможно для анализа сложных схем МИЭК и электротехнических устройств на их основе, описание ЭМП которых системой дифференциальных уравнений приводит к достаточно громоздким математическим выкладкам.

2. Разработаны математические модели ИЕП на основе МИЭК, новизна которых заключается в использовании интегральных параметров и уточненной схемы замещения МИЭК, учитывающей активное сопротивление и магнитную связь проводящих обкладок МИЭК, для исследования ЭМП, происходящих в ИЕП на основе двухсекционной структуры МИЭК (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017611392 от 02.02.2017). Произведена оценка параметров, характеризующих ИЕП как стабилизатор тока и усилитель напряжения. По результатам моделирования установлено, что в режиме резонанса МИЭК достигается максимальный коэффициент усиления по напряжению и осуществляется стабилизация тока нагрузки максимальной амплитуды, следовательно, в резонансном режиме работы изученная

двухсекционная структура МИЭК применима для устройств, работающих как источник тока, например, для заряда ЕН.

На основе разработанных математических моделей получено, что требуемая частотная зависимость входного и передаточного сопротивлений ИЕП обеспечивается в диапазоне изменения частоты от $0,7 \cdot f_{рез.}$ до $1,15 \cdot f_{рез.}$ и от $0,5 \cdot f_{рез.}$ до $1,5 \cdot f_{рез.}$ соответственно. Показано, что двухсекционная структура МИЭК с диагональным подключением источника питания и нагрузки и параллельным соединением секций с электрическим выводом в середине вторичной обкладки обладает высоким коэффициентом усиления по напряжению и рекомендуется к использованию в высоковольтных источниках вторичного электропитания с функцией стабилизации тока.

В результате исследований определено схемотехническое исполнение ИЕП на основе МИЭК с диагональным подключением источника питания и нагрузки и последовательным соединением секций с электрическим выводом в середине вторичной обкладки, обладающее наилучшими стабилизирующими свойствами по току нагрузки в пределах $\pm 15\%$ в диапазоне частот от $0,75 \cdot f_{рез.}$ до $1,35 \cdot f_{рез.}$. Показано, что в диапазоне изменения сопротивления нагрузки от $0,1 \cdot \rho$ до $5 \cdot \rho$ (волнового сопротивления) данное схемотехническое решение ИЕП на основе МИЭК обладает лучшими стабилизирующими свойствами, в частности характеризуется коэффициентом отклонения действующего значения тока нагрузки ($k = 1,9\%$) в 5 раз меньшим, чем у схем ИЕП на основе дискретных ЭМЭ ($k = 9,45\%$).

3. Разработана компьютерная модель системы заряда ЕН с ИЕП на основе МИЭК. Произведен выбор параметров преобразователя, которые при известных вариациях нагрузки обеспечивали бы заданную точность стабилизации тока нагрузки. Получено, что использование в качестве звена повышенной частоты ИЕП на основе МИЭК обеспечивает режим заряда ЕН с максимальным КПД, повышает добротность и уменьшает массу и габариты коммутационного контура.

Выявлен наиболее эффективный с энергетической точки зрения режим работы системы заряда с КПД 95 %.

4. Разработаны математические модели МИЭК и предложена программа для ЭВМ для расчета показателей надежности МИЭК в пакете прикладных программ *MathCad*. По результатам исследований, проведенных с помощью разработанных моделей, произведен выбор критериев надежности МИЭК и выполнена оценка показателей надежности различных структур МИЭК с учетом составляющих МИЭК элементов, степени интеграции и выполняемых им функций. Выявлено, что интегрированное исполнение компонента приводит к снижению интенсивности потока отказов в 1,5 раза, увеличению вероятности безотказной работы на 20 % для двухсекционного МИЭК. Показано, что надежность интегрированного компонента выше, чем у схемы на дискретных ЭМЭ за счет уменьшения числа элементов, отсутствия дополнительных межэлементных и монтажных соединений, паек.

ГЛАВА 4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ РАЗРАБОТАННЫХ УСТРОЙСТВ

4.1 Разработка методики и алгоритма расчета параметров индуктивно-емкостных преобразователей, работающих в составе мостовых инверторов

4.1.1 Расчет последовательного автономного резонансного инвертора с индуктивно-емкостным преобразователем, выполненным на основе гибридного электромагнитного элемента

При разработке методики расчета необходимо учитывать особенности системы, в составе которой будет работать ИЕП. Последовательный LC -контур в автономных резонансных инверторах (АИР) определяет колебательный характер тока и обеспечивает выключение коммутационной аппаратуры (полупроводниковых ключей) [134]. При этом нагрузка соединяется последовательно или параллельно с колебательным контуром, либо подключается параллельно к одному из реактивных элементов [135].

В зависимости от соотношения индуктивности и емкости колебательного контура и вариантов подключения нагрузки АИР работают как инверторы (источники) напряжения, когда источник питания характеризуется низким сопротивлением для переменной составляющей входного тока, либо как инверторы (источники) тока (обладающие высоким сопротивлением) [136].

Для повышения эффективности АИР в качестве LC -контура предлагается использовать ИЕП (рисунок 4.1), индуктивность и емкость которого рассчитываются так, чтобы частота собственных колебаний ω_0 превосходила по значению частоту коммутации полупроводниковых ключей ω [137].

Исходными данными являются напряжение питающей сети U , номинальная мощность P_n , выходная частота f [138].

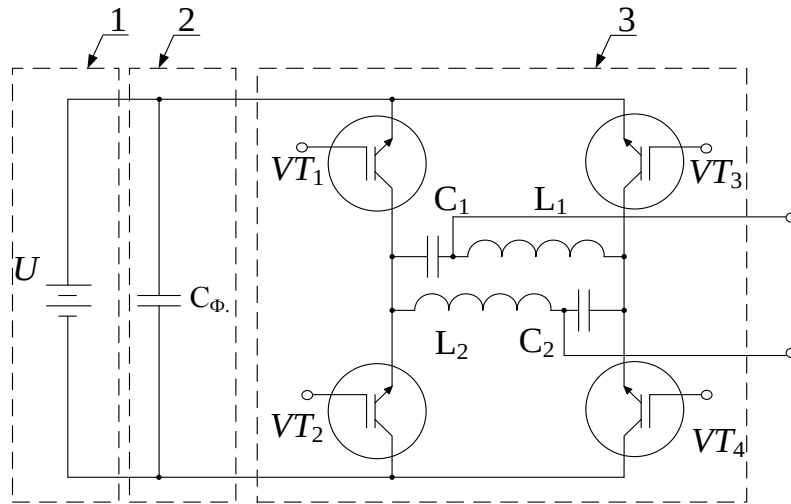


Рисунок 4.1 – Схема последовательного АИР с ИЕП на дискретных ЭМЭ:

1 – источник постоянного напряжения; 2 – емкостный фильтр;

3 – АИР с ИЕП на дискретных ЭМЭ

Сопротивление нагрузки $Z_{\text{н}}$ задается функцией

$$\underline{Z}_{\text{н.}} = |\underline{Z}_{\text{н.}}| \cdot e^{-j \cdot \phi},$$

где $Z_{\text{н}}$ – полное сопротивление нагрузки;

ϕ – сдвиг фаз.

Значение емкости ИЕП вычисляется по формуле

$$C = \frac{1}{\omega \cdot K_{\text{н.}} \cdot Z_{\text{н.}}},$$

где $K_{\text{н.}}$ – коэффициент нагрузки.

Находим индуктивность ИЕП из уравнения

$$L = \frac{\mu_0 \cdot w^2 \cdot d_{\text{ср}} \cdot \Phi}{4 \cdot \pi},$$

где μ_0 – магнитная постоянная;

w – число слоев меди в геометрической схеме замещения;

$d_{\text{ср.}}$ – средний диаметр;

Φ – магнитный поток [9].

Частотный коэффициент определяют по формуле

$$F = \omega^2 \cdot L \cdot C.$$

Длительность протекания анодного тока находим из уравнения [139]

$$\lambda = \frac{2 \cdot \pi \cdot F}{\sqrt{4 \cdot F - \frac{1}{K_{н.}^2}}}.$$

Определяем максимальное напряжение на ИЕП по уравнению [139]

$$U_{cm} = \frac{4 \cdot h \cdot U_d}{\pi \cdot a \cdot \omega \cdot C \cdot Z_{н.}},$$

где a – коэффициент, зависящий от схемы инвертора.

Находим среднее значение тока источника питания

$$I_d = P_{н.} / U_d.$$

Рассчитываем действующее значение тока нагрузки I_n и действующее значение тока источника питания I_{dg}

$$I_{н.} = \frac{P_{н.}}{U_{н.} \cdot \cos \phi}.$$

$$I_{dg} = I_{н.}.$$

Находим полный угол запираания тиристоров δ и время выключения тиристоров [135]

$$t_{\theta.} = \frac{\delta}{2 \cdot \pi \cdot f}.$$

Определяем среднее значение анодного тока тиристоров

$$I_a = \frac{I_d}{2}.$$

Далее требуется рассчитать электрические и геометрические параметры и выбрать структуру гибридного ЭМЭ, который будет выполнять роль ИЕП, исходя из найденных значений индуктивности и емкости LC -контура. Следовательно, для создания ИЕП требуется определить параметры и выбрать структуру МИЭК, выполняющего одновременно функцию стабилизатора тока и LC -контура инвертора (рисунок 4.2) [56].

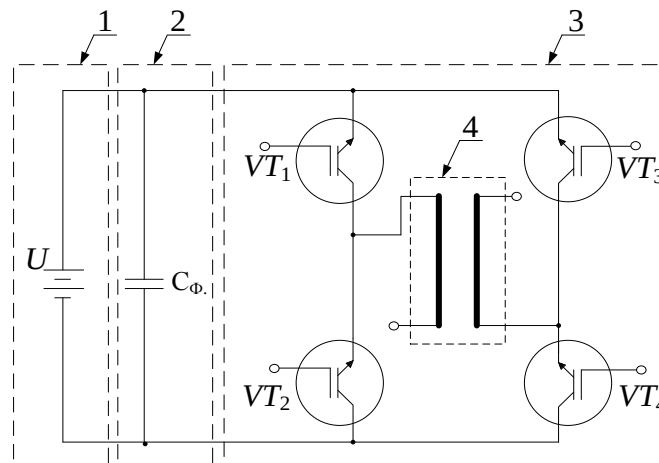


Рисунок 4.2 – Схема последовательного АИР с ИЕП на основе МИЭК:

1 – источник постоянного напряжения; 2 – емкостный фильтр;

3 – АИР; 4 – ИЕП на основе МИЭК

Число и способ соединения секций, варианты включения МИЭК в схему определяются режимом работы системы, в состав которой входит МИЭК.

4.1.2 Определение конфигурации индуктивно-емкостного преобразователя и выбор оптимальной структуры многофункционального интегрированного электромагнитного компонента

В данной диссертации исследуется двухсекционная структура МИЭК, на основе которой можно создать множество схем ИЕП, среди которых по результатам расчетов и исследований выбирается схема, обеспечивающая заданные значения коэффициентов стабилизации тока нагрузки и усиления по напряжению, стабилизирующая ток нагрузки в требуемом диапазоне вариации частоты [107, 108]. Стабилизирующие свойства ИЕП, выполненных на основе гибридных ЭМЭ, изучены и подробно описаны в [59, 61, 133].

4.1.3 Расчет параметров выбранной структуры многофункционального интегрированного электромагнитного компонента

Расчет параметров выбранной структуры МИЭК производится методом, использующим интегральные параметры МИЭК, к которым относятся суммарная индуктивность обкладок L , полная емкость C и токи электрических выводов

проводящих обкладок $\underline{I}_{\text{вх.}}$, $\underline{I}_{\text{н.}}$). Также возможен расчет ЭМП с использованием линейных алгебраических уравнений, составленных по законам Кирхгофа на основе схем замещения МИЭК на дискретных компонентах.

Для примера расчета выберем одну из исследованных в главе 3 схем ИЕП, приведенную в пункте 5 таблицы 3.1, которая имеет электрический вывод в середине вторичной обкладки МИЭК и обладает наилучшими стабилизационными свойствами [140].

Система уравнений, описывающая процессы в двухсекционном МИЭК, для схемы ИЕП, показанной в пункте 5 таблицы 3.1:

$$\begin{cases} \underline{U}_{\text{вх.}} = \underline{U}_{\text{пл.1}} + \underline{U}_1, \\ \underline{U}_1 = \frac{\underline{I}_{\text{вх.}} - \underline{I}_1}{j \cdot \omega \cdot C_1}, \\ \underline{U}_2 = \frac{\underline{I}_1 - \underline{I}_{\text{н.}}}{j \cdot \omega \cdot C_2}, \\ \underline{U}_{\text{пл.1}} = (R_1 + j \cdot \omega \cdot (L_1 + M)) \cdot (\underline{I}_{\text{вх.}} + \underline{I}_{\text{н.}}), \\ \underline{U}_1 = \underline{U}_{\text{пл.1}} + \underline{U}_{\text{пл.2}} + \underline{U}_{\text{н.}}, \\ \underline{I}_1 = \underline{I}_{\text{н.}}, \\ \underline{I}_{\text{н.}} = \frac{\omega \cdot C \cdot \underline{U}_{\text{вх.}}}{2 \cdot j}, \\ \underline{I}_{\text{н.}} = \frac{\underline{U}_{\text{вх.}}}{2 \cdot (R + j \cdot \omega \cdot (L + M))}. \end{cases}$$

Разработана программа для ЭВМ, позволяющая определить коэффициент стабилизации тока нагрузки ИЕП и построить частотные характеристики МИЭК в пакете прикладных программ *MathCad* [104].

По результатам исследований, проведенных с помощью разработанных математических и компьютерных моделей, разработан алгоритм расчета ИЕП, выполненного на основе МИЭК, представленный на рисунке 4.3.

Особенность разработанной методики заключается в расчете электрических и геометрических параметров МИЭК, выполняющего одновременно функции стабилизатора тока и LC -контура инвертора [140].

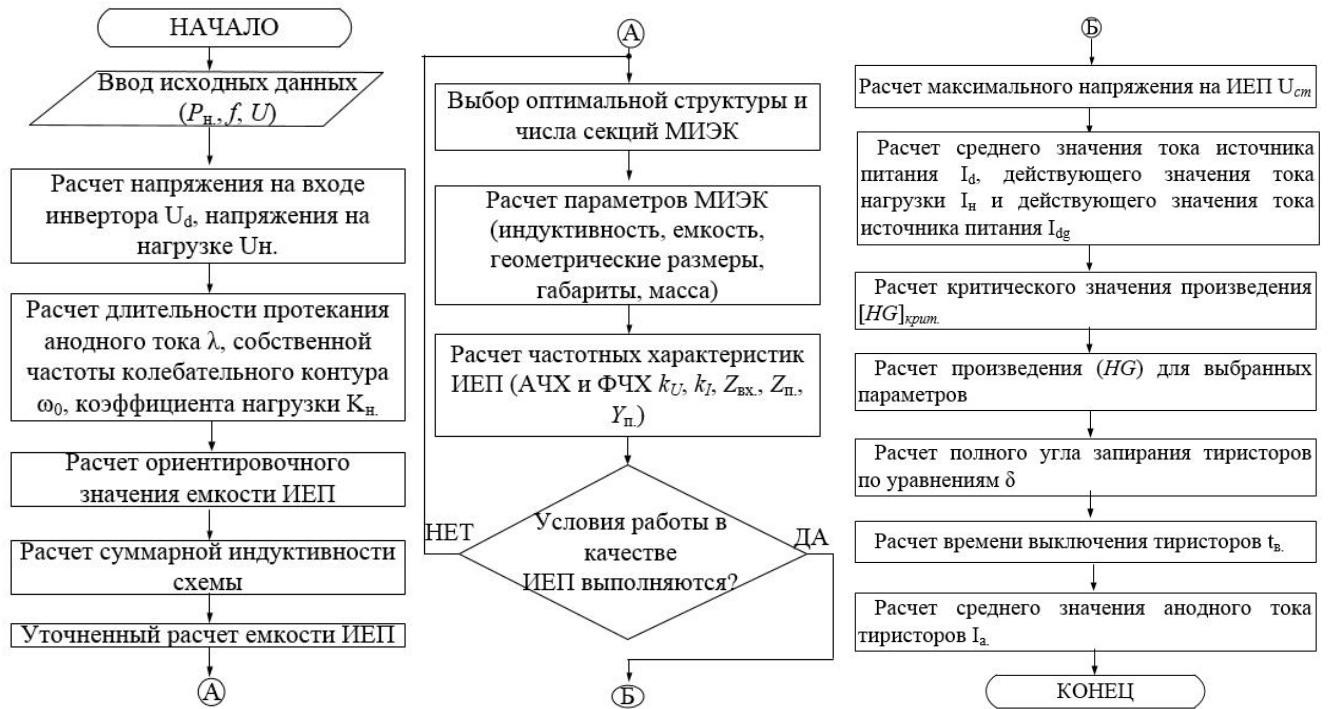


Рисунок 4.3 – Алгоритм расчета ИЕП на основе МИЭК

4.2 Экспериментальные исследования индуктивно-емкостных преобразователей и подтверждение адекватности моделей

4.2.1 Экспериментальные исследования индуктивно-емкостного преобразователя на основе односекционного многофункционального интегрированного электромагнитного компонента

Схема односекционного МИЭК показана на рисунке 3.2. Система уравнений, описывающая эту схему, приведена в пункте 3.3 главы 3.

Исследуем частотные характеристики односекционной структуры МИЭК и произведем экспериментальную оценку адекватности разработанных математических моделей. Экспериментальный макет представлен на рисунке 4.4.

Электрические параметры макетного образца МИЭК: емкость $C = 1,015$ мкФ, индуктивность обкладок $L = 0,39$ мГн, активное сопротивление обкладок $R = 1$ Ом. Геометрические параметры макетного образца односекционного МИЭК: длина обкладки $l = 20$ м, количество витков $w = 100$,

ширина медной ленты $b = 5$ см, толщина медной ленты $\delta = 12$ мкм. Резонансная частота для данного случая составляет $f_{\text{рез.}} = 9,6$ кГц, действующее значение входного напряжения равно 6 В.

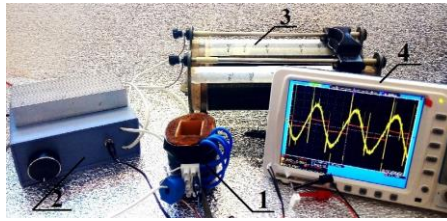


Рисунок 4.4 – Экспериментальный макет МИЭК с подключенными приборами:

1 – односекционный МИЭК; 2 – система управления; 3 – нагрузка;

4 – осциллограф

Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) – зависимость коэффициента передачи ЭМЭ от частоты – строится по значениям, измеренным при помощи генератора и электронного вольтметра или осциллографа.

Результаты расчетов и экспериментов представлены рисунках с 4.5 по 4.12. Для удобства сравнения и анализа результатов исследований измеренные и рассчитанные параметры переведены в относительные единицы.

На рисунке 4.5 показана зависимость коэффициента усиления по напряжению от частоты (в о.е.).

Функция передачи напряжений (коэффициент усиления по напряжению) – это отношение напряжений на выходе и на входе цепи:

$$k_u = \underline{U}_n / \underline{U}_v,$$

где $\underline{U}_n$, $\underline{U}_v$ – комплексные напряжения соответственно на входе и выходе цепи.

В режиме резонанса МИЭК достигается максимальный коэффициент усиления по напряжению ($k_u = 9$). Допустимое отклонение коэффициента усиления по напряжению для ИЕП составляет не более 50 % [12]. Для рассматриваемой схемы устройства на основе односекционного МИЭК данный параметр находится в пределах от 4,55 до 9,1 в диапазоне изменения частоты от $0,85 \cdot f_{\text{рез.}}$ до $1,15 \cdot f_{\text{рез.}}$. Таким образом, в диапазоне изменения частоты от -15 % до

+15 % происходит снижение коэффициента усиления по напряжению не превышает 50 %. При этом сравнение результатов экспериментов с расчетными данными показывает, что отличие экспериментальных данных от расчетных составляет не более 9,6 %.

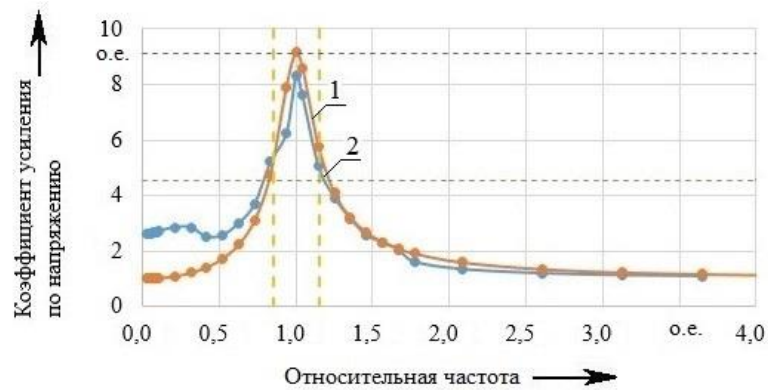


Рисунок 4.5 – АЧХ коэффициента усиления по напряжению:

1 – односекционный МИЭК; 2 – система управления; 3 – нагрузка;

4 – осциллограф

На рисунке 4.6 показана зависимость коэффициента стабилизации по току от частоты (в о.е.).

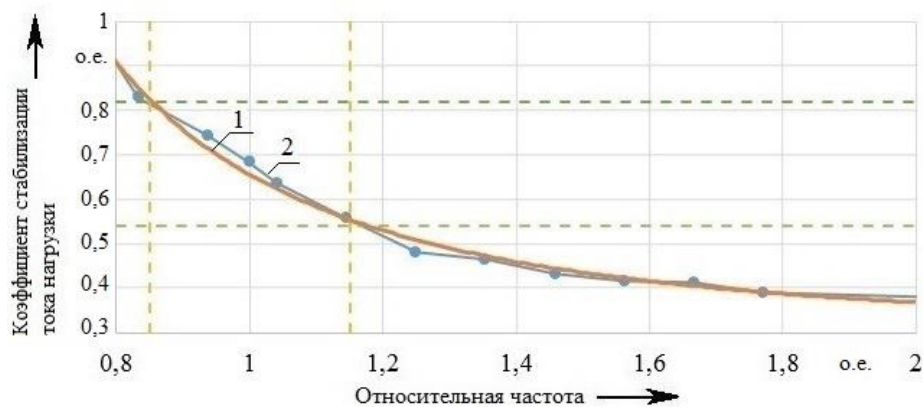


Рисунок 4.6 – АЧХ коэффициента стабилизации тока:

1 – расчетные данные; 2 – экспериментальные данные

В режиме резонанса МИЭК достигается коэффициент стабилизации тока нагрузки ($\delta = 0,7$). Допустимое отклонение коэффициента стабилизации тока для ИЕП в составе ССТ составляет не более 15 % [22]. Для рассматриваемой схемы ИЕП на основе односекционного МИЭК данный параметр находится в пределах

от 0,6 до 0,8 в диапазоне изменения частоты от $0,89 \cdot f_{\text{рез.}}$ до $1,05 \cdot f_{\text{рез.}}$. При этом сравнение результатов экспериментов с расчетными данными показывает, что отличие экспериментальных данных от расчетных составляет не более 6,3 %.

На рисунке 4.7 показана зависимость входного сопротивления от частоты (в о.е.).

Входное сопротивление – это отношение напряжения на входе $\underline{U}_{\text{вх.}}$ к входному току $\underline{I}_{\text{вх.}}$:

$$\underline{Z}_{\text{вх.}} = \underline{U}_{\text{вх.}} / \underline{I}_{\text{вх.}}$$

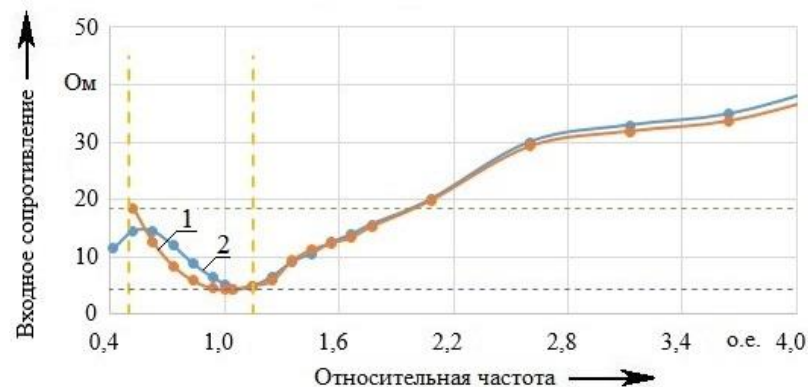


Рисунок 4.7 – АЧХ входного сопротивления:

1 – расчетные данные; 2 – экспериментальные данные

Требуемое условие работы МИЭК в качестве ИЕП – снижение входного сопротивления ИЕП на основе МИЭК с ростом частоты ($18,5 \text{ Ом} > Z_{\text{вх.}} > 4,3 \text{ Ом}$) будет выполняться в диапазоне изменения частоты от $0,5 \cdot f_{\text{рез.}}$ до $1,15 \cdot f_{\text{рез.}}$. При этом сравнение результатов экспериментов с расчетными данными показывает, что отличие экспериментальных данных от расчетных составляет не более 4,5 %.

На рисунке 4.8 показана зависимость передаточного сопротивления от частоты (в о.е.).

Передаточное сопротивление – это отношение напряжения на выходе $\underline{U}_{\text{н.}}$ к входному току $\underline{I}_{\text{вх.}}$:

$$\underline{Z}_{\text{п.}} = \underline{U}_{\text{н.}} / \underline{I}_{\text{вх.}}$$

Требуемое условие работы МИЭК в качестве ИЕП – уменьшение передаточного сопротивления ИЕП на основе МИЭК с ростом частоты ($55 \text{ Ом} > Z_{\text{пер.}} > 34 \text{ Ом}$) – будет выполняться в диапазоне изменения частоты

от $0,42 \cdot f_{\text{рез.}}$ до $1,4 \cdot f_{\text{рез.}}$. При этом сравнение результатов экспериментов с расчетными данными в исследуемом диапазоне показывает, что отличие экспериментальных данных от расчетных составляет не более 15 %.

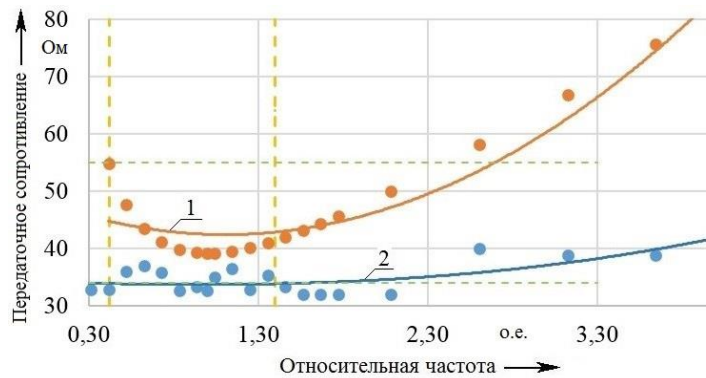


Рисунок 4.8 – АЧХ передаточного сопротивления:

1 – расчетные данные; 2 – экспериментальные данные

На рисунке 4.9 показана зависимость передаточной проводимости от частоты (в о.е.).

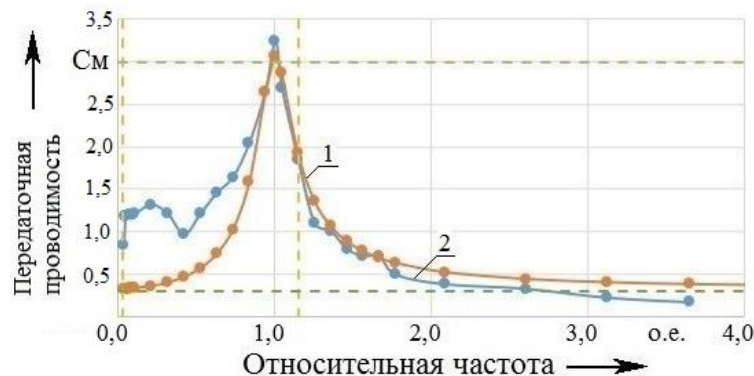


Рисунок 4.9 – АЧХ передаточной проводимости:

1 – расчетные данные; 2 – экспериментальные данные

Передаточная проводимость – это отношение тока на выходе $I_{\text{вых.}}$ к входному напряжению $U_{\text{вх.}}$:

$$Y_{\text{п.}} = I_{\text{вых.}} / U_{\text{вх.}}$$

Требуемое условие работы МИЭК в качестве ИЕП – увеличение передаточной проводимости ИЕП на основе МИЭК с ростом частоты ($0,3 \text{ См} < Y_{\text{пер.}} < 3 \text{ См}$) будет выполняться в диапазоне изменения частоты от $0,02 \cdot f_{\text{рез.}}$ до $1,05 \cdot f_{\text{рез.}}$. При этом сравнение результатов экспериментов с расчетными

данными показывает, что отличие экспериментальных данных от расчетных составляет не более 15 %.

Проведено экспериментальное подтверждение адекватности разработанных моделей на макетном образце МИЭК. Расхождение результатов эксперимента и моделирования находится в диапазоне от 4,5 % до 15 % для стабилизации тока нагрузки в пределах ± 15 % изменения частоты [141, 142].

4.2.2 Экспериментальные исследования индуктивно-емкостных преобразователей на основе двухсекционного многофункционального интегрированного электромагнитного компонента

Выполним экспериментальное исследование и оценку стабилизационных свойств трех схем ИЕП, разработанных в главе 2 и исследованных с помощью математических моделей в главе 3.

Выполним исследование режимов работы двухсекционной структуры МИЭК выбранного схемотехнического исполнения с высоким коэффициентом стабилизации тока нагрузки, схема которого представлена в пункте 2 таблицы 3.3.

В данной диссертации проведено исследование частотных и энергетических характеристик ИЕП на основе двухсекционного МИЭК, которое показывает, что для рассматриваемого схемотехнического решения МИЭК требуемое условие работы в качестве ИЕП соблюдается в диапазоне изменения частоты от $0,5 \cdot f_{\text{рез.}}$ до $1,15 \cdot f_{\text{рез.}}$.

Произведена экспериментальная оценка адекватности разработанной математической модели. Для экспериментальных исследований собрана схема с двухсекционным МИЭК, представленным в пункте 5 таблицы 3.1.

Электрические параметры макетного образца МИЭК: емкость $C = 0,289$ мкФ, индуктивность обкладок $L = 0,029$ мГн, активное сопротивление обкладок 183 мОм. Геометрические параметры макетного образца двухсекционного МИЭК: длина обкладки $l = 20$ м, количество витков $w = 34$, ширина медной ленты $b = 5$ см, толщина медной ленты $\delta = 12$ мкм. Резонансная

частота для данного случая составляет $f_{\text{рез.}} = 30$ кГц, действующее значение входного напряжения равно 6 В.

Проведенные эксперименты позволили построить графики зависимостей тока нагрузки от величины сопротивления нагрузки и установить форму тока нагрузки при работе на активную нагрузку, получены осциллограммы выходного тока, полученные ранее в программном пакете *MathCad* с помощью разработанной математической модели.

Результаты расчетов и экспериментов представлены на рисунке 4.10, где показана зависимость коэффициента стабилизации по току от частоты (в о.е.). Из рисунка 4.10 можно сделать вывод о том, что результаты экспериментов и математического моделирования отличаются не более, чем на 15 %.

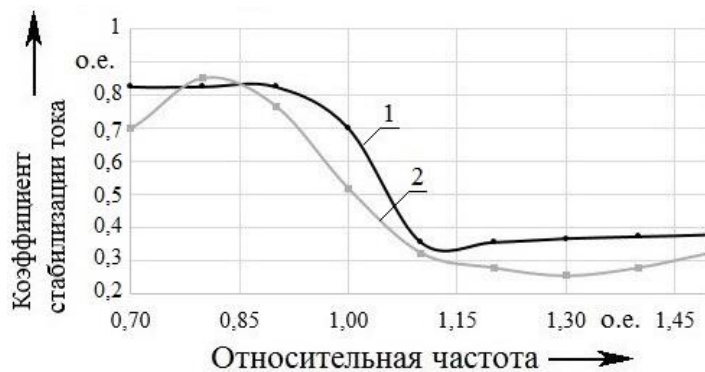


Рисунок 4.10 – АЧХ коэффициента стабилизации тока нагрузки:

1 – расчетные данные; 2 – экспериментальные данные

Подобные графики зависимости коэффициента стабилизации тока нагрузки от частоты построены также для всех исследуемых в данной диссертации схем ИЕП [143, 144].

В режиме резонанса МИЭК достигается коэффициент стабилизации тока нагрузки, равный $\delta = 0,7$. Допустимое отклонение коэффициента стабилизации тока для ИЕП, работающего в составе ССТ, составляет не более 15 % [2, 3, 28]. Для рассматриваемой схемы ИЕП на основе двухсекционного МИЭК данный параметр находится в пределах от 0,6 до 0,8 в диапазоне изменения частоты от $0,7 \cdot f_{\text{рез.}}$ до $1,1 \cdot f_{\text{рез.}}$. При этом сравнение результатов экспериментов с расчетными

данными показывает, что отличие экспериментальных данных от расчетных составляет не более 15 %.

Проведено экспериментальное подтверждение адекватности разработанных моделей. Для стабилизации тока нагрузки в пределах ± 15 % изменения частоты расхождение результатов эксперимента и моделирования не превышает 15 % [143, 144].

Выполним исследование режимов работы двухсекционной структуры МИЭК выбранного схмотехнического исполнения с высоким коэффициентом усиления по напряжению, схема которого представлена в пункте 3 таблицы 3.3, эффективных с энергетической точки зрения для применения в высоковольтных источниках вторичного электропитания.

Для высоковольтных источников вторичного электропитания, применяемых в ССТ, важным является обеспечение высокой энергетической эффективности процесса электропитания потребителя. Это достигается использованием ИЕП, которые могут обеспечить высокий коэффициент усиления по напряжению и требуемое значение коэффициента стабилизации тока нагрузки при вариации значения сопротивления нагрузки в широком диапазоне регулирования частоты [3, 6, 21]. Кроме того, при разработке инженерных методик расчета и алгоритмов проектирования высоковольтных источников вторичного электропитания на базе ИЕП требуется проверять обязательное условие работы ИЕП в режиме короткого замыкания – снижение входного и передаточного сопротивлений с увеличением частоты, а также осуществлять оценку коэффициента стабилизации и влияния на его значение изменения сопротивления нагрузки [54, 59]. Следовательно, актуальной задачей является исследование частотных характеристик МИЭК и оценка стабилизационных свойств ИЕП на их основе [53]. При этом стабилизационные свойства ИЕП исследуются при отклонении частоты от резонансной [22].

Основными задачами исследования являются оценка коэффициента усиления по напряжению и стабилизационных свойств ИЕП, расчет и анализ

характеристик двухсекционной структуры МИЭК, работающего в качестве ИЕП, в составе высоковольтного источника вторичного электропитания, экспериментальное подтверждение адекватности разработанных математических моделей.

В [63] определено схмотехническое решение двухсекционного МИЭК, обладающее высоким коэффициентом усиления по напряжению, наиболее эффективное для применения в источниках вторичного электропитания высоковольтных потребителей. Исследуемая схема двухсекционного МИЭК представлена в пункте 3 таблицы 3.3. Макетные образцы двухсекционных МИЭК, которые использовались для экспериментов показаны на рисунке 4.11.



Рисунок 4.11 – Макетные образцы двухсекционных МИЭК

С помощью разработанной математической модели произведен расчет параметров стабилизации и усиления, входного и передаточных сопротивлений и проводимости МИЭК, определен допустимый диапазон вариации частоты в зависимости от требуемой точности стабилизации тока нагрузки.

На рисунке 4.12 показана зависимость коэффициента усиления по напряжению от частоты (в о.е.), полученная с помощью математической модели ИЕП.

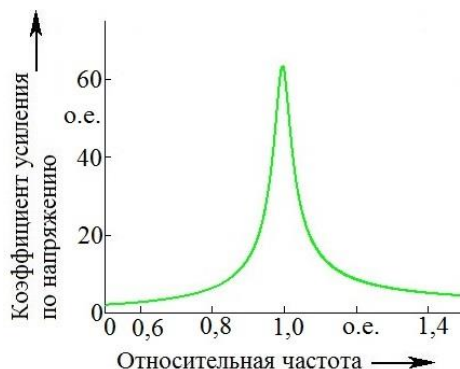


Рисунок 4.12 – АЧХ коэффициента усиления по напряжению

Математическая модель, приведенная в пункте 3 таблицы 3.3, показывает, что данная схема ИЕП позволяет получить большое значение коэффициента усиления по напряжению (например, 100-кратного увеличения входного напряжения), значение которого зависит от добротности резонансного LC -контура. Добротность контура определяется также активным сопротивлением нагрузки. Из математической модели получена аналитическая зависимость:

$$k_U(\alpha) = \frac{4 \cdot 2,845 \cdot R_n \cdot \sqrt{\frac{C}{L}} \cdot (4 + 2,845^2 \cdot \alpha^2)}{\sqrt{(8 - 2,845^2 \cdot \alpha^2) \cdot 4 \cdot 2,845^2 \cdot \alpha^2 \cdot R_n^2 \cdot \frac{C}{L} + 24 \cdot 2,845^4 \cdot \alpha^4}}.$$

Чем больше сопротивление нагрузки, тем больше коэффициент усиления по напряжению ИЕП.

Выполнено экспериментальное подтверждение адекватности разработанной математической модели ИЕП на основе двухсекционной структуры МИЭК. Сравнение результатов экспериментов с расчетными данными показывает, что отличие экспериментальных данных от расчетных составляет не более 11 %. Следовательно, разработанную математическую модель можно использовать для выбора параметров МИЭК с целью обеспечения эффективного режима работы ИЕП для высоковольтных источников вторичного электропитания.

Результаты сравнения расчетов, произведенных с помощью математической модели, и экспериментов представлены рисунках с 4.13 по 4.18.

Зависимость коэффициента усиления по напряжению от частоты (в о.е.) приведена на рисунке 4.13.

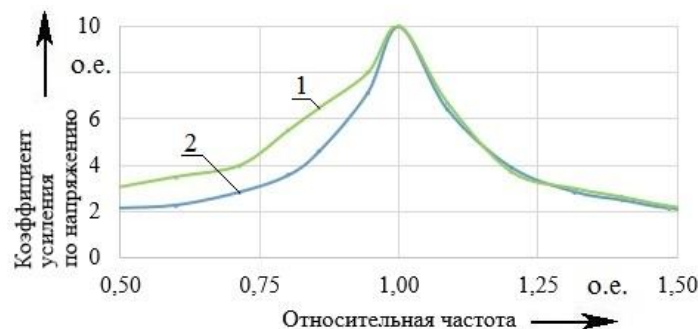


Рисунок 4.13 – АЧХ коэффициента усиления по напряжению:

1 – расчетные данные; 2 – экспериментальные данные

В режиме резонанса достигается коэффициент усиления по напряжению равный $k_u = 10$. Для рассматриваемой схемы ИЕП на основе двухсекционного МИЭК данный параметр находится в пределах от 5 до 10 в диапазоне изменения частоты от $0,85 \cdot f_{\text{рез.}}$ до $1,15 \cdot f_{\text{рез.}}$, причем допустимое отклонение коэффициента усиления по напряжению для ИЕП составляет не более 50 % [12].

Зависимость коэффициента стабилизации по току от частоты (в о.е.) приведена на рисунке 4.14.

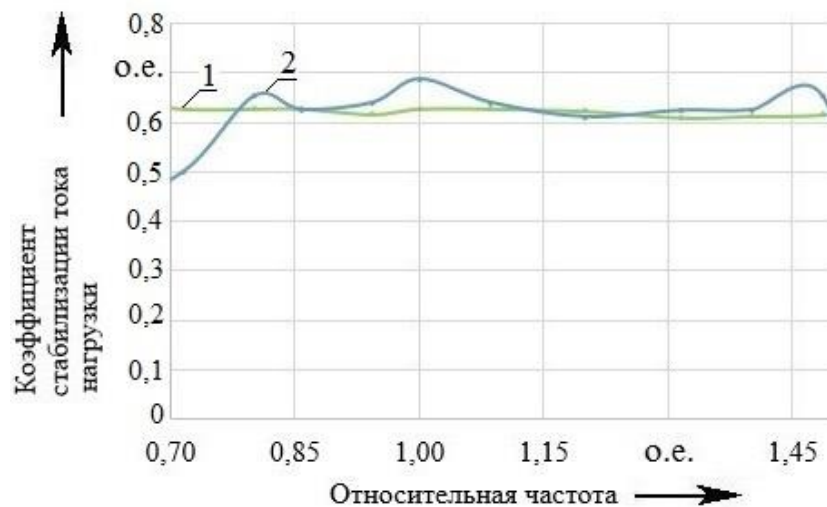


Рисунок 4.14 – АЧХ коэффициента стабилизации тока нагрузки:

1 – расчетные данные; 2 – экспериментальные данные

В режиме резонанса МИЭК достигается коэффициент стабилизации тока нагрузки $\delta = 0,65$. Для рассматриваемой схемы ИЕП на основе двухсекционного МИЭК данный параметр находится в пределах от 0,55 до 0,75 в диапазоне изменения частоты от $0,7 \cdot f_{\text{рез.}}$ до $1,5 \cdot f_{\text{рез.}}$, причем допустимое отклонение коэффициента стабилизации тока для ИЕП, работающего в составе ССТ, составляет не более 15 %. При этом сравнение результатов экспериментов с расчетными данными показывает, что отличие экспериментальных данных от расчетных составляет не более 15 %.

Зависимость входного сопротивления от частоты (в о.е.) приведена на рисунке 4.15. Требуемое условие работы МИЭК в качестве ИЕП – снижение входного сопротивления ИЕП на основе МИЭК с ростом частоты

($10 \text{ Ом} > Z_{\text{вх.}} > 1,5 \text{ Ом}$) будет выполняться в диапазоне изменения частоты от $0,7 \cdot f_{\text{рез.}}$ до $1,15 \cdot f_{\text{рез.}}$. При этом сравнение результатов экспериментов с расчетными данными показывает, что отличие экспериментальных данных от расчетных составляет не более 13 %.

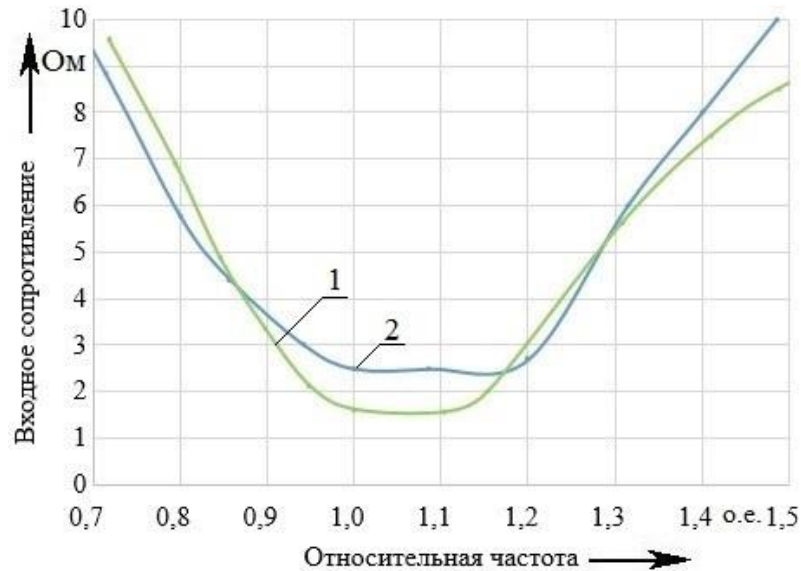


Рисунок 4.15 – АЧХ входного сопротивления:

1 – расчетные данные; 2 – экспериментальные данные

Зависимость передаточного сопротивления от частоты (в о.е.) приведена на рисунке 4.16.

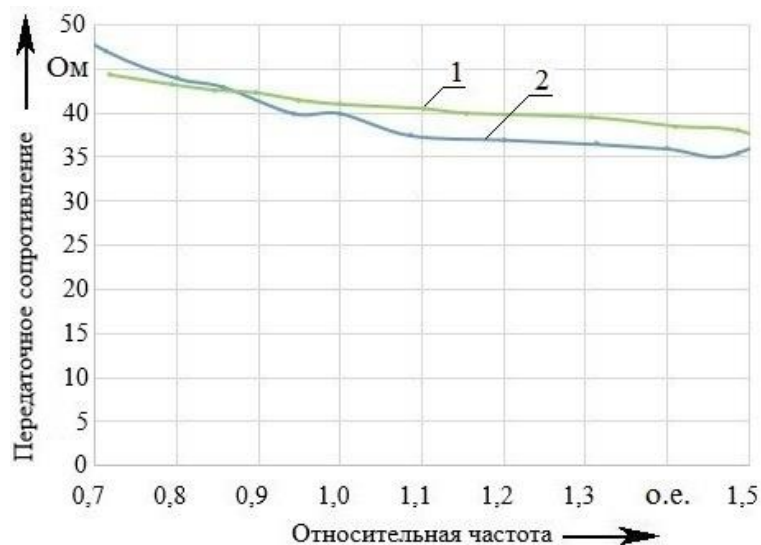


Рисунок 4.16 – АЧХ передаточного сопротивления:

1 – расчетные данные; 2 – экспериментальные данные

Требуемое условие работы МИЭК в качестве ИЕП – уменьшение передаточного сопротивления ИЕП на основе МИЭК с ростом частоты ($50 \text{ Ом} > Z_{\text{пер.}} > 35 \text{ Ом}$) будет выполняться в диапазоне изменения частоты от $0,5 \cdot f_{\text{рез.}}$ до $1,5 \cdot f_{\text{рез.}}$. При этом сравнение результатов экспериментов с расчетными данными показывает, что отличие экспериментальных данных от расчетных составляет не более 6 %.

Зависимость передаточного сопротивления от частоты (в о.е.) приведена на рисунке 4.17.



Рисунок 4.17 – АЧХ передаточной проводимости:

1 – расчетные данные; 2 – экспериментальные данные

Требуемое условие работы МИЭК в качестве ИЕП – увеличение передаточной проводимости ИЕП на основе МИЭК с ростом частоты ($5 \text{ См} < Y_{\text{пер.}} < 7,4 \text{ См}$) будет выполняться в диапазоне изменения частоты от $0,7 \cdot f_{\text{рез.}}$ до $1,1 \cdot f_{\text{рез.}}$. При этом сравнение результатов экспериментов с расчетными данными показывает, что отличие экспериментальных данных от расчетных составляет не более 12 %.

По результатам моделирования установлено, что:

- в режиме резонанса МИЭК достигается максимальный коэффициент усиления по напряжению ($k_u = 10$), значение которого зависит от добротности резонансного LC -контра и может достигать значительной величины (до 100). Для исследованной схемы устройства на основе двухсекционного МИЭК

отклонение данного параметра находится в допустимых пределах в диапазоне изменения частоты от $0,85 \cdot f_{\text{рез.}}$ до $1,15 \cdot f_{\text{рез.}}$.

- в режиме резонанса МИЭК достигается коэффициент стабилизации тока нагрузки, равный $\delta = 0,7$. Для рассматриваемой схемы ИЕП на основе двухсекционного МИЭК отклонение данного параметра находится в допустимых пределах в диапазоне изменения частоты $0,7 \cdot f_{\text{рез.}}$ до $1,5 \cdot f_{\text{рез.}}$.

- требуемое условие работы МИЭК в качестве ИЕП – снижение входного и передаточного сопротивлений с ростом частоты ($10 \text{ Ом} > Z_{\text{вх.}} > 1,5 \text{ Ом}$ и $50 \text{ Ом} > Z_{\text{пер.}} > 35 \text{ Ом}$) будет выполняться в диапазоне изменения частоты от $0,7 \cdot f_{\text{рез.}}$ до $1,15 \cdot f_{\text{рез.}}$ и от $0,5 \cdot f_{\text{рез.}}$ до $1,5 \cdot f_{\text{рез.}}$ соответственно.

- требуемое условие работы МИЭК в качестве ИЕП – увеличение передаточной проводимости с ростом частоты ($5 \text{ См} < Y_{\text{пер.}} < 7,4 \text{ См}$) будет выполняться в диапазоне изменения частоты от $0,7 \cdot f_{\text{рез.}}$ до $1,1 \cdot f_{\text{рез.}}$.

Проведено экспериментальное подтверждение адекватности разработанных моделей на макетном образце МИЭК. Расхождение результатов эксперимента и моделирования находится в диапазоне от 6 % до 15 % для изменения коэффициента усиления по напряжению в пределах 50 % и стабилизации тока нагрузки в пределах ± 15 % изменения частоты.

В [60] выполнена оценка частотных характеристик схем ИЕП на основе двухсекционной структуры МИЭК, по результатам которой описаны варианты расширения функциональных возможностей МИЭК. Получено, что диагональное подключение источника питания и нагрузки и параллельное соединение секций МИЭК наиболее оптимально для создания на основе МИЭК следующих устройств: ИЕП, устройств заряда ЕН, генераторов импульсов напряжения [143]. Выполним исследование режимов работы двухсекционной структуры МИЭК выбранного схемотехнического исполнения, схема которого представлена в пункте 1 таблицы 3.3.

Рассчитаны частотные характеристики двухсекционной структуры МИЭК и произведена экспериментальная оценка адекватности разработанной

математической модели. Выполнено исследование режимов работы двухсекционной структуры МИЭК выбранного схмотехнического исполнения.

Результаты расчетов и экспериментов представлены рисунках с 4.18 по 4.22.

На рисунке 4.18 показана зависимость коэффициента усиления по напряжению от частоты (в о.е.).

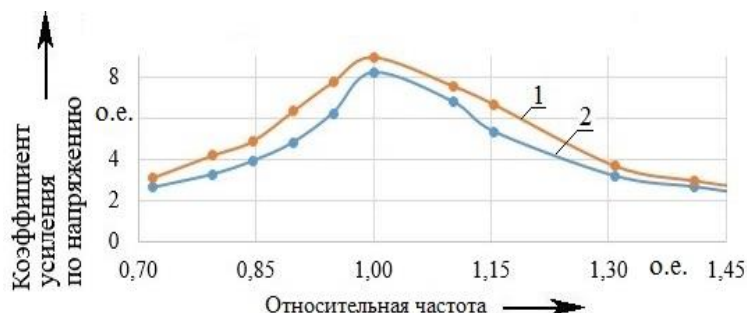


Рисунок 4.18 – АЧХ коэффициента усиления по напряжению:

1 – расчетные данные; 2 – экспериментальные данные

В режиме резонанса МИЭК достигается максимальный коэффициент усиления по напряжению ($k_u = 9$). Допустимое отклонение коэффициента усиления по напряжению для ИЕП составляет не более 50 % [143]. Для рассматриваемой схемы устройства на основе двухсекционного МИЭК данный параметр находится в пределах от 6 до 12 в диапазоне изменения частоты от $0,85 \cdot f_{\text{рез.}}$ до $1,3 \cdot f_{\text{рез.}}$. Таким образом, в диапазоне изменения частоты от -15 % до +30 % происходит снижение коэффициента усиления по напряжению не превышает 50 %. При этом сравнение результатов экспериментов с расчетными данными показывает, что отличие экспериментальных данных от расчетных составляет не более 11 %.

На рисунке 4.19 показана зависимость коэффициента стабилизации по току от частоты (в о.е.).

В режиме резонанса МИЭК достигается коэффициент стабилизации тока нагрузки ($\delta = 0,8$). Допустимое отклонение коэффициента стабилизации тока для ИЕП, работающего в составе ССТ, составляет не более 15 % [143]. Для рассматриваемой схемы ИЕП на основе двухсекционного МИЭК данный параметр находится в пределах от 0,7 до 0,9 в диапазоне изменения частоты от

$0,7 \cdot f_{рез.}$ до $1,1 \cdot f_{рез.}$. При этом сравнение результатов экспериментов с расчетными данными показывает, что отличие экспериментальных данных от расчетных составляет не более 15 %.



Рисунок 4.19 – АЧХ коэффициента стабилизации тока нагрузки:

1 – расчетные данные; 2 – экспериментальные данные

На рисунке 4.20 показана зависимость входного сопротивления от частоты (в о.е.).

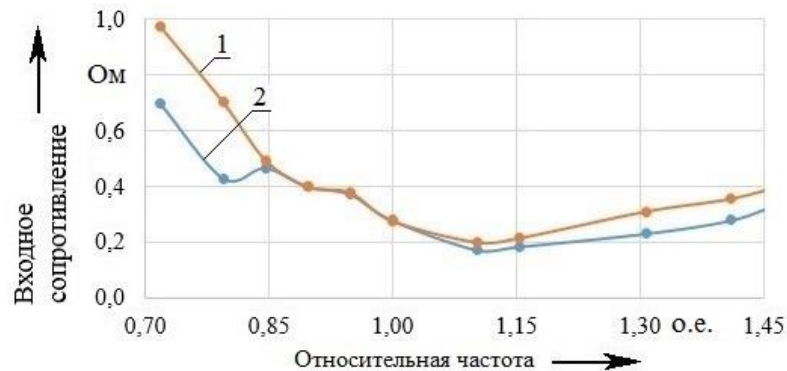


Рисунок 4.20 – АЧХ входного сопротивления:

1 – расчетные данные; 2 – экспериментальные данные

Требуемое условие работы МИЭК в качестве ИЕП – снижение входного сопротивления ИЕП на основе МИЭК с ростом частоты ($1 \text{ Ом} > Z_{вх.} > 0,2 \text{ Ом}$) будет выполняться в диапазоне изменения частоты от $0,7 \cdot f_{рез.}$ до $1,15 \cdot f_{рез.}$. При этом сравнение результатов экспериментов с расчетными данными показывает, что отличие экспериментальных данных от расчетных составляет не более 13 %.

На рисунке 4.21 показана зависимость передаточного сопротивления от частоты (в о.е.).

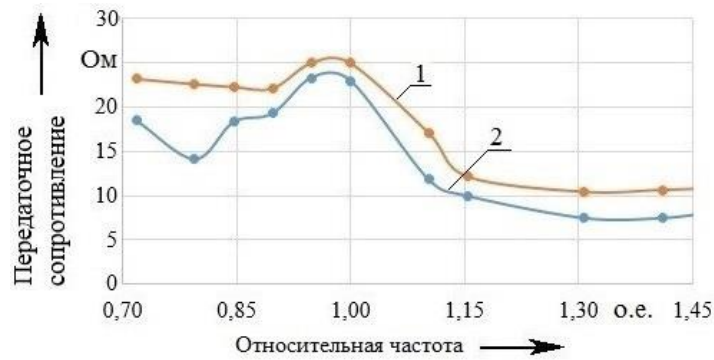


Рисунок 4.21 – АЧХ передаточного сопротивления:

1 – расчетные данные; 2 – экспериментальные данные

Требуемое условие работы МИЭК в качестве ИЕП – уменьшение передаточного сопротивления ИЕП на основе МИЭК с ростом частоты ($23 \text{ Ом} > Z_{\text{пер.}} > 7,5 \text{ Ом}$) будет выполняться в диапазоне изменения частоты от $0,9 \cdot f_{\text{рез.}}$ до $1,4 \cdot f_{\text{рез.}}$. При этом сравнение результатов экспериментов с расчетными данными показывает, что отличие экспериментальных данных от расчетных составляет не более 15 %.

На рисунке 4.22 показана зависимость передаточной проводимости от частоты (в о.е.).

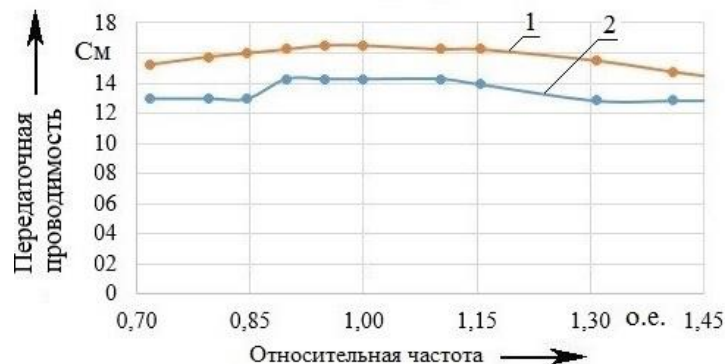


Рисунок 4.22 – АЧХ передаточной проводимости:

1 – расчетные данные; 2 – экспериментальные данные

Требуемое условие работы МИЭК в качестве ИЕП – увеличение передаточной проводимости ИЕП на основе МИЭК с ростом частоты ($15 \text{ См} < Y_{\text{пер.}} < 17 \text{ См}$) будет выполняться в диапазоне изменения частоты от $0,7 \cdot f_{\text{рез.}}$ до $1,1 \cdot f_{\text{рез.}}$. При этом сравнение результатов экспериментов с расчетными данными показывает, что отличие экспериментальных данных от расчетных

составляет не более 15 %. Результаты исследований частотных характеристик двухсекционного МИЭК, работающего в качестве ИЕП, проведенные на основе математической модели МИЭК, показывают, что коэффициент усиления по напряжению достигает максимального значения в резонансном режиме работы МИЭК.

По результатам моделирования установлено, что в режиме резонанса МИЭК достигается максимальный коэффициент усиления по напряжению ($k_u = 9$) и осуществляется стабилизации тока нагрузки максимальной амплитуды ($I_{н.мах.} = 0,6$). Для исследованной схемы устройства на основе двухсекционного МИЭК отклонение данных параметров находится в допустимых пределах в диапазоне изменения частоты от $0,85 \cdot f_{рез.}$ до $1,3 \cdot f_{рез.}$ и $0,7 \cdot f_{рез.}$ до $1,1 \cdot f_{рез.}$ соответственно. Также в режиме резонанса МИЭК достигается коэффициент стабилизации тока нагрузки, равный $\delta = 0,2$. Для рассматриваемой схемы ИЕП на основе двухсекционного МИЭК отклонение данного параметра находится в допустимых пределах в диапазоне изменения частоты от $0,89 \cdot f_{рез.}$ до $1,05 \cdot f_{рез.}$.

В результате моделирования также установлено, что требуемое условие работы МИЭК в качестве ИЕП – снижение входного и передаточного сопротивлений с ростом частоты ($1 \text{ Ом} > Z_{вх.} > 0,2 \text{ Ом}$ и $23 \text{ Ом} > Z_{пер.} > 7,5 \text{ Ом}$) будет выполняться в диапазоне изменения частоты от $0,7 \cdot f_{рез.}$ до $1,15 \cdot f_{рез.}$ и от $0,9 \cdot f_{рез.}$ до $1,4 \cdot f_{рез.}$ соответственно.

Проведено экспериментальное подтверждение адекватности разработанных моделей на макетном образце МИЭК. Расхождение результатов эксперимента и моделирования находится в диапазоне от 11 % до 15 % для стабилизации тока нагрузки в пределах ± 15 % изменения частоты.

4.2.3 Оценка режимов работы многофункционального интегрированного электромагнитного компонента в составе индуктивно-емкостных преобразователей

При проектировании ИЕП, принимая решение о конструкционном исполнении МИЭК, важно знать, насколько сильным будет влияние соотношения

параметров секций двухсекционной структуры МИЭК на частотные характеристики и стабилизационные свойства ИЕП.

Электрические параметры макетных образцов МИЭК представлены в таблице 4.1. Индексы 1 и 2 относятся к первой и второй секциям проводящих обкладок соответственно. Первому способу намотки соответствует макетный образец под кодовым наименованием «МИЭК 1», второму варианту намотки соответствует макетный образец под кодовым наименованием «МИЭК 2».

Таблица 4.1 – Параметры макетных образцов МИЭК

Параметр	МИЭК 1	МИЭК 2
R_1 , мОм	183	191
R_2 , мОм	208	195
L_1 , мкГн	29	38
L_2 , мкГн	41	38
C_{12} , мкФ	0,289	0,218

Результаты сравнения стабилизационных свойств и частотных характеристик двухсекционной структуры МИЭК, имеющей идентичные или разные параметры секций, представлены рисунках с 4.23 по 4.27.

На рисунке 4.23 показана зависимость коэффициента стабилизации по току от относительной частоты.



Рисунок 4.23 – АЧХ коэффициента стабилизации тока нагрузки:

1 – «МИЭК 1»; 2 – «МИЭК 2»

В режиме резонанса «МИЭК 2» достигается коэффициент стабилизации тока нагрузки $\delta = 0,7$, для «МИЭК 1» коэффициент стабилизации тока нагрузки $\delta = 0,5$, т.е. меньше в 1,5 раза. Для рассматриваемой схемы ИЕП на основе двухсекционного «МИЭК 2» данный параметр находится в пределах от 0,6 до 0,8

в диапазоне изменения частоты от $0,75 \cdot f_{\text{рез.}}$ до $1,05 \cdot f_{\text{рез.}}$. Для рассматриваемой схемы ИЕП на основе двухсекционного «МИЭК 1» данный параметр находится в пределах от 0,13 до 0,15 в диапазоне изменения частоты от $0,9 \cdot f_{\text{рез.}}$ до $1,05 \cdot f_{\text{рез.}}$.

На рисунке 4.24 показана зависимость коэффициента усиления по напряжению от относительной частоты.

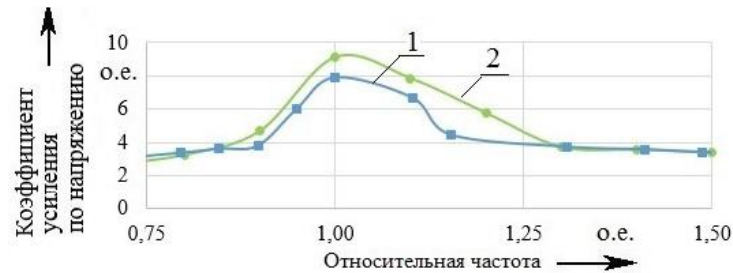


Рисунок 4.24 – АЧХ коэффициента усиления по напряжению:

1 – «МИЭК 1»; 2 – «МИЭК 2»

В режиме резонанса «МИЭК 2» достигается максимальный коэффициент усиления по напряжению ($k_u = 9$), для «МИЭК 1» максимальный коэффициент усиления по напряжению равен $k_u = 8$. При этом результаты моделирования показывают, что можно добиться значительного (100-кратного) увеличения входного напряжения при использовании МИЭК с одинаковыми параметрами при соответствующей добротности резонансного LC -контура.

Для рассматриваемой схемы устройства на основе двухсекционного «МИЭК 2» данный параметр находится в пределах от 4,5 до 9 в диапазоне изменения частоты от $0,85 \cdot f_{\text{рез.}}$ до $1,15 \cdot f_{\text{рез.}}$. Для рассматриваемой схемы ИЕП на основе двухсекционного «МИЭК 1» данный параметр находится в пределах от 4 до 8 в диапазоне изменения частоты от $0,85 \cdot f_{\text{рез.}}$ до $1,1 \cdot f_{\text{рез.}}$.

На рисунке 4.25 показана зависимость входного сопротивления от относительной частоты.

Требуемое условие работы МИЭК в качестве ИЕП – снижение входного сопротивления ИЕП на основе МИЭК с ростом частоты будет выполняться для «МИЭК 2» и «МИЭК 1» в одинаковом диапазоне изменения частоты от $0,75 \cdot f_{\text{рез.}}$

до $1,2 \cdot f_{\text{рез.}}$. Однако, значение входного сопротивления «МИЭК 1» ($35 \text{ Ом} > Z_{\text{вх.1}} > 15 \text{ Ом}$) выше, чем «МИЭК 2» ($20 \text{ Ом} > Z_{\text{вх.2}} > 5 \text{ Ом}$).



Рисунок 4.25 – АЧХ входного сопротивления:

1 – «МИЭК 1»; 2 – «МИЭК 2»

На рисунке 4.26 показана зависимость передаточного сопротивления от относительной частоты.

Требуемое условие работы МИЭК в качестве ИЕП – снижение передаточного сопротивления ИЕП на основе МИЭК с ростом частоты будет выполняться для «МИЭК 2» и «МИЭК 1» в одинаковом диапазоне изменения частоты от $0,75 \cdot f_{\text{рез.}}$ до $1,2 \cdot f_{\text{рез.}}$. Но значение входного сопротивления «МИЭК 1» ($15 \text{ Ом} > Z_{\text{п.1}} > 14 \text{ Ом}$) выше, чем «МИЭК 2» ($10 \text{ Ом} > Z_{\text{п.2}} > 8 \text{ Ом}$).

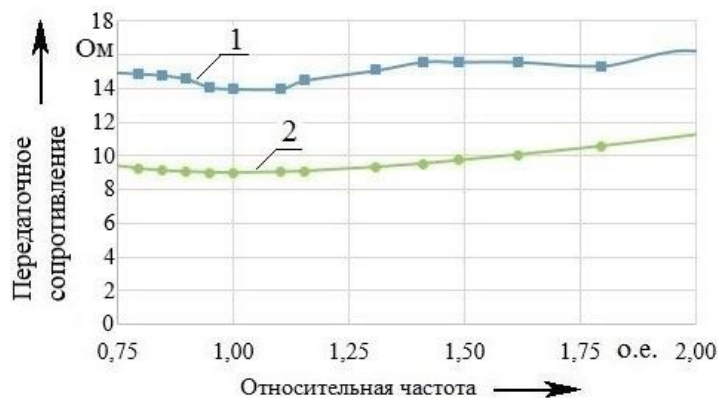


Рисунок 4.26 – АЧХ передаточного сопротивления:

1 – «МИЭК 1»; 2 – «МИЭК 2»

На рисунке 4.27 показана зависимость передаточного сопротивления от относительной частоты.

Требуемое условие работы МИЭК в качестве ИЕП – увеличение передаточной проводимости ИЕП на основе МИЭК с ростом частоты – будет выполняться для «МИЭК 2» и «МИЭК 1» в одинаковом диапазоне изменения частоты от $0,75 \cdot f_{\text{рез.}}$ до $1,15 \cdot f_{\text{рез.}}$. Однако, значение передаточной проводимости «МИЭК 1» ($1 \text{ См} < Y_{\text{п.1}} < 2 \text{ См}$) ниже, чем «МИЭК 2» ($2 \text{ См} < Y_{\text{п.2}} < 8 \text{ См}$).

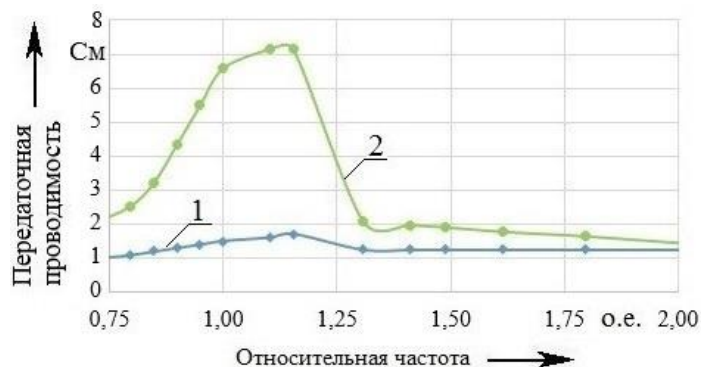


Рисунок 4.27 – АЧХ передаточной проводимости:

1 – «МИЭК 1»; 2 – «МИЭК 2»

По результатам моделирования установлено, что в режиме резонанса «МИЭК 2» достигается коэффициент стабилизации тока нагрузки $\delta = 0,7$, для «МИЭК 1» коэффициент стабилизации тока нагрузки $\delta = 0,5$, т.е. меньше в 1,5 раза.

В режиме резонанса «МИЭК 2» достигается максимальный коэффициент усиления по напряжению ($k_u = 9$), для «МИЭК 1» максимальный коэффициент усиления по напряжению равен $k_u = 8$. В режиме резонанса МИЭК осуществляется стабилизации тока нагрузки максимальной амплитуды. Требуемые условия работы МИЭК в качестве ИЕП будут выполняться для обоих конструкционных исполнений двухсекционной структуры МИЭК в одинаковом диапазоне изменения частоты.

Проведено экспериментальное подтверждение адекватности разработанных моделей на макетном образце МИЭК. Расхождение результатов эксперимента и моделирования находится в диапазоне от 10 % до 15 % для изменения коэффициента усиления по напряжению в пределах 50 % и стабилизации тока нагрузки в пределах ± 15 % изменения частоты.

4.3 Практическая реализация и внедрение разработанных устройств

Практическая ценность результатов работы подтверждается справками о результатах внедрения научных исследований на предприятиях ООО НИЦ «Энергодиагностика», ЗАО «Уфа-АвиаГаз» и в учебном процессе кафедры электротехники и электрооборудования предприятий УГНТУ (приложение В).

Внедрены технические решения ССТ с ИЕП, выполненными на базе МИЭК (устройство заряда емкостного накопителя, генератор импульсов напряжения), получившие патентную защиту, используемые в производстве работ по разработке новых испытательных установок и систем термического воздействия на объекты нефтегазовой отрасли.

Результаты научных исследований в области оценки надежности электромагнитных элементов (табличные данные показателей надежности гибридных ЭМЭ – МИЭК) используются для оценки (расчета) показателей надежности различных электротехнических устройств на их основе (ИЕП, устройств заряда емкостных накопителей, генераторов импульсов, устройств для испытания изоляции повышенным напряжением).

Материалы данной диссертационной работы внедрены в учебный процесс по направлению 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» на кафедре «Электротехника и электрооборудование предприятий» и используются при чтении дисциплин «Общая энергетика», «Электрические и электронные аппараты» и «Электротехнологические установки и системы для нефтегазовой отрасли».

Выводы по главе 4

1. По результатам исследований, проведенных с помощью созданных математических моделей, разработана методика и предложен алгоритм расчета параметров ИЕП на основе МИЭК различного схмотехнического исполнения, работающего в составе мостового инвертора. Особенность разработанной методики заключается в расчете электрических и геометрических параметров МИЭК, выполняющего одновременно функции стабилизатора тока и LC -контура инвертора. Алгоритм позволяет определить параметры ИЕП с учетом требуемой точности стабилизации тока нагрузки и заданного диапазона изменения сопротивления нагрузки.

2. Проведено экспериментальное подтверждение адекватности разработанных моделей. Созданы макетные образцы МИЭК. Выполнено сравнение результатов математических расчетов с результатами экспериментов. Расхождение результатов экспериментов и моделирования не превышает 15 % для стабилизации тока нагрузки в пределах ± 15 % изменения частоты.

3. На основе изученных структур МИЭК разработаны и внедрены на предприятии ООО Научно-инженерный центр «Энергодиагностика» схмотехнические решения ИЕП с высокими удельными энергетическими параметрами, улучшенными удельными массогабаритными показателями и показателями надежности. Результаты научных исследований используются на предприятии ЗАО «Уфа-АвиаГаз» и внедрены в учебный процесс УГНТУ на кафедре ЭЭП.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. По результатам аналитического обзора и патентных исследований установлены требования, предъявляемые к ИЕП для ССТ, определены основные параметры и характеристики ИЕП, которые необходимо учитывать при проектировании и разработке ССТ на основе ИЕП. Обосновано применение функциональной интеграции ЭМЭ для разработки ИЕП и показана эффективность параметрических стабилизаторов тока на основе гибридных ЭМЭ для решения задач стабилизации тока. По результатам анализа гибридных ЭМЭ произведен выбор гибридного ЭМЭ, называемого МИЭК, для построения ССТ с ИЕП, выполненных на основе базовых структур МИЭК.

2. Разработано и запатентовано техническое решение ИЕП, позволяющее уменьшить массу и габариты устройства, повысить надежность за счет уменьшения числа компонентов, глубокой интеграции элементов при обеспечении регулирования резонансной частоты в широких пределах и возможности регулирования уровня выходного напряжения. В разработанном ИЕП реализовано снижение уровня резонансного напряжения и тока, что позволяет предложенному ИЕП работать в режиме холостого хода (патент РФ на изобретение № 2450413). Разработано и запатентовано новое техническое решение ИЕП, позволяющее расширить функциональные возможности устройства за счет использования двухсекционной структуры МИЭК, способной на основе одного компонента реализовать множество схем ИЕП с разными параметрами стабилизации (патент РФ на изобретение № 2632412).

3. Разработаны математические модели ИЕП, новизна которых заключается в использовании интегральных параметров и уточненной схемы замещения МИЭК, учитывающей активное сопротивление и магнитную связь проводящих обкладок МИЭК, для исследования ЭМП в ИЕП на основе двухсекционной структуры МИЭК (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017611392 от 02.02.2017). В результате исследований стабилизационных свойств и режимов работы ИЕП на основе МИЭК различного схемотехнического

исполнения показана возможность использования одного гибридного ЭМЭ (одной структуры МИЭК) для создания схем ИЕП, удовлетворяющих различным требованиям. В результате исследований определено схмотехническое исполнение ИЕП на основе МИЭК, обладающее наилучшими стабилизирующими свойствами по току нагрузки в пределах $\pm 15\%$ в диапазоне частот от $0,75 \cdot f_{\text{рез.}}$ до $1,35 \cdot f_{\text{рез.}}$. Выявлена схема, осуществляющая стабилизацию тока нагрузки большей амплитуды ($i_{\text{н.3}} = 1,23 > i_{\text{н.1}} = 0,352 > i_{\text{н.2}} = 0,235$), обладающая наибольшим коэффициентом усиления по напряжению ($k_{U3} = 75 > k_{U1} = 20 > k_{U2} = 13,5$). Показано, что в диапазоне изменения сопротивления нагрузки от $0,1 \cdot \rho$ до $5 \cdot \rho$ (волнового сопротивления) данное схмотехническое решение ИЕП на основе МИЭК обладает лучшими стабилизирующими свойствами, в частности характеризуется коэффициентом отклонения действующего значения тока нагрузки ($k = 1,9\%$) в 5 раз меньшим, чем у схем ИЕП на основе дискретных ЭМЭ ($k = 9,45\%$).

Созданы компьютерные модели разработанных электротехнологических систем с ИЕП на основе МИЭК (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017619387 от 24.08.2017). Проведены исследования ЭМП, происходящих в ИЕП, в результате которых выявлен наиболее эффективный с энергетической точки зрения режим работы системы заряда с КПД 95 %.

Разработаны математические модели МИЭК и предложена программа для ЭВМ для расчета показателей надежности МИЭК в пакете прикладных программ *MathCad* (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017614066 от 06.04.2017). Произведен выбор критериев надежности МИЭК и выполнена оценка показателей надежности различных структур МИЭК с учетом составляющих МИЭК элементов, степени интеграции и выполняемых им функций. Выявлено, что интегрированное исполнение компонента приводит к снижению интенсивности потока отказов в 1,5 раза, увеличению вероятности безотказной работы на 20 % для двухсекционного МИЭК.

4. По результатам исследований, проведенных с помощью созданных математических моделей, разработаны методика и алгоритм расчета параметров ИЕП на основе МИЭК различного схмотехнического исполнения. Особенность разработанной методики заключается в расчете электрических и геометрических параметров МИЭК, выполняющего одновременно функции стабилизатора тока и *LC*-контура инвертора. Алгоритм позволяет определить параметры ИЕП с учетом требуемой точности стабилизации тока нагрузки и заданного диапазона изменения сопротивления нагрузки.

5. Созданы макетные образцы МИЭК и проведено экспериментальное подтверждение адекватности разработанных моделей. Расхождение результатов моделирования и экспериментов находится в пределах от 4,5 до 15 %. На основе изученных структур МИЭК разработаны и внедрены схмотехнические решения ИЕП и ССТ на их базе с высокими удельными энергетическими параметрами, улучшенными удельными массогабаритными показателями и показателями надежности на предприятии ООО НИЦ «Энергодиагностика». Результаты научных исследований используются на предприятии ЗАО «Уфа-АвиаГаз» и внедрены в учебный процесс УГНТУ на кафедре ЭЭП.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Задерей, Г.П. Многофункциональные магнитные радиокомпоненты (многофункциональные электронно-магнитные трансформаторы).– М.: изд-во Сов. радио, 1980.– 136 с.
2. Милях, А.Н., Кубышин, Б.Е., Волков, И.В. Индуктивно-емкостные преобразователи источников напряжения в источники тока // Киев: изд-во Наукова думка, 1964.– 299 с.
3. Волков, И.В., Милях, А.Н. Системы неизменного тока на основе индуктивно-емкостных преобразователей.– Киев: изд-во Наукова думка, 1974.– 216 с.
4. Бочаров, В., Гуренков, Н., Корнилов, А., Парфенов, Е., Резников, С. Электроэнергетическая и электромагнитная совместимость вторичных источников импульсного питания с автономными системами электроснабжения переменного тока. Часть II: Обзор и систематизация известных структур и схем основных узлов. Приближенные критерии оценки элементов.– Силовая электроника, 2009.– № 4.– С. 74-78.– [Электронный ресурс].– URL: http://www.power-e.ru/2009_4_74.php (дата обращения: 03.09.2018).
5. Бочаров, В., Гуренков, Н., Корнилов, А., Парфенов, Е., Резников, С. Электроэнергетическая и электромагнитная совместимость вторичных источников импульсного питания с автономными системами электроснабжения переменного тока. Часть IV: Модернизация известных и разработка новых схмотехнических средств.– Силовая электроника, 2010.– № 2.– С. 52-59.– [Электронный ресурс].– URL: http://www.power-e.ru/2010_2_52.php (дата обращения: 03.09.2018).
6. Дозоров С.А. Исследование и разработка индуктивно-емкостных источников питания // Диссертация на соискание уч. степ. канд. техн. наук.– Санкт-Петербург, 2013.– 203 с.
7. Пат. № 2585248 Российская Федерация, Н03Н 7/00. Многофункциональный интегрированный электромагнитный компонент / С.Г. Конесев; заявитель

- Конесев Сергей Геннадьевич.— № 2012114845/08; заявл. 13.04.2012, опубл. 27.05.2016. Б.И. № 15.— 6 с.
8. Конесев, С.Г. Многофункциональные интегрированные элементы для управляемых систем питания устройств специального назначения // Диссертация на соискание уч. степ. канд. техн. наук.— УАИ, 1992.— 182 с.
 9. Конесев, С.Г., Хазиева, Р.Т. Функциональная интеграция как техническое средство развития электромагнитных элементов // Повышение надежности и энергоэффективности электротехнических систем и комплексов: межвуз. сб. науч. тр. с междунар. уч.— Уфа: изд-во УГНТУ, 2014.— С. 135-138.
 10. Конесев, С.Г., Хазиева, Р.Т. Индуктивно-емкостные преобразователи. Применение в электротехнике и обзор схмотехнических решений // Ресурсо-энергосбережение и эколого-энергетическая безопасность промышленных городов: сб. тр. 3-й Всерос. науч.-практ. конф.— Волжский: изд-во филиал МЭИ, 2010.— С. 120-125.
 11. Ильинский, Н.Ф., Москаленко, В.В. Электропривод: энерго- и ресурсосбережение: учебное пособие для вузов.— М.: изд-во Академия, 2008.— С. 124.
 12. Резников, С., Бочаров, В, Коняхин, С., Гуренков, Н. Электроэнергетическая и электромагнитная совместимость вторичный источник импульсного питания с автономными системами электроснабжения переменного тока. Часть V. Моделирование индуктивно емкостных преобразователей с выпрямительно-емкостной нагрузкой в составе однокаскадных и двухкаскадных вторичный источник импульсного питания // Силовая электроника, 2010.— № 3.— С. 48-53.— [Электронный ресурс].— URL: http://www.power-e.ru/2010_3_48.php (дата обращения: 03.09.2018).
 13. Хазиева, Р.Т. Система стабилизации тока на основе гибридного электромагнитного элемента // Севергеоэкотех-2016: сб. XVII Междунар. мол. науч. конф. мол. уч. Ухта: изд-во УГТУ, 2016.— ч. 1.— С. 79-81.

14. Красноцветов, В.Е. Источник питания для заряда емкостного накопителя энергии // Сб. тез. Томский политехнический университет.– С. 306-307.– [Электронный ресурс].– <http://www.lib.tpu.ru/fulltext/c/2014/C36/V1/111.pdf> (дата обращения: 03.09.2018).
15. Вакуленко, В.М., Иванов, Л.П. Источники электропитания лазеров.– М.: изд-во Сов. радио, 1980.– 104 с.
16. Boucherot P. Calculus des alternateurs, transformateurs et alternomoteurs, Paris, 1910.
17. Steinmetz. Theory and Calculation of Alternating Current Phenomena, Mc Graw Nill, 1908.
18. Steinmetz. Theory and Calculation of Electric Circuits, Mc Graw Nill, 1917.
19. Хазиева, Р.Т., Бочкарева, Т.А. Индуктивно-емкостные преобразователи для электротехнологий. Обзор схмотехнических решений // Севергеоэкотех-2017: сб. XVIII Междунар. мол. науч. конф. мол. уч.– Ухта: изд-во УГТУ, 2017.
20. Конесев, С.Г., Хазиева, Р.Т., Кириллов, Р.В., Хлюпин, П.А. Компьютерная модель системы заряда емкостного накопителя на основе индуктивно-емкостного преобразователя // Нефтегазовое дело: электр. науч. журн., 2015.– №4.– С. 374-390.– [Электронный ресурс].– URL: http://ogbus.ru/issues/4_2015/ogbus_4_2015_p374-390_KonesevSG_ru.pdf (дата обращения: 03.09.2018).
21. Кабан, В.П., Матвеев, В.Ю., Губаревич, В.Н., Спирин, В.М. Расчет схем Г-образных индуктивно-емкостных преобразователей *CL*-вида с учетом характера нагрузки // Сб. Института электродинамики НАН Украины.– Киев, 2012.– № 33.– С. 83-87.
22. Кабан, В.П. Сравнительный анализ Т-образных индуктивно-емкостных преобразователей *CLL*-структуры по установленной мощности реактивных элементов // Сб. Института электродинамики НАН Украины. Киев, 2012.– № 33.– С. 87-91.

23. Губаревич, В.Н., Кабан, В.П., Матвеев, В.Ю., Спирин, В.М., Подольный, С.В. Регулирование уровня стабилизированного тока в однофазной системе инвертор – индуктивно-емкостный преобразователь.– Сб. Института электродинамики НАН Украины.– Киев, 2009.– С. 89.
24. Хазиева, Р.Т., Кириллов, Р.В., Колесникова, О.И. Hybrid electromagnetic elements for electrical devices // Вестник молодого ученого УГНТУ, 2015.– №2.– С. 83-87.
25. ГОСТ 23871-79. Трансформаторы электронно-магнитные многофункциональные. Термины и определения. Введ. 01.01.1981.
26. Волков, И.В., Закревский, С.И., Пшеничный, В.В. Гибридный элемент электрической цепи – индукон и его использование в качестве преобразователя источника напряжения в источник тока // Проблемы преобразовательной техники: тез. док. Всесоюз. науч.-техн. конф.– Киев, 1983.– 2 с.
27. Кашин, Ю.А. Деконные системы преобразования электромагнитной энергии / Ю.А. Кашин, Р.С. Сибагатуллин, Р.А. Тухватуллин, И.М. Хомяков // Проблемы преобразовательной техники: тез. док. Всесоюз. науч.-техн. конф.– Киев, 1983.– 2 с.
28. А.с. № 345601 СССР, H03K3/335. Генератор импульсов тока / А.А. Гейзер, В.Л. Чехлов, Г.Л. Чехлов; заявитель НИИ ядерной физики, электроники и автоматики при Томском политехническом институте им. С.М. Кирова.– № 1488149/26-9; заявл. 27.10.1970, опубл. 14.07.1972. Бюл. № 22.– 2 с.
29. А.с. № 433625 СССР, H03K3/335. Генератор импульсов тока / В.В. Ивашин, Э.Т. Фурман; аявитель НИИ ядерной физики, электроники и автоматики.– № 1783995/26-25; заявл. 12.05.1872, опубл. 25.06.1974. Бюл. № 23.– 3 с.
30. Бердников, С.В. Узлы принудительной коммутации тиристоров с обмоткой-емкостью // Проблемы преобразовательной техники: тез. док. Всесоюз. науч.-техн. конф.– Киев, 1983.
31. А.с. № 1492453 СССР, H03K3/53. Спиральный генератор импульсов напряжения / С.Г. Конесев, В.И. Мельников, С.В. Осинцев, Р.А. Тухватуллин;

- заявитель УАИ им. Серго Орджоникидзе.– № 4261577; заявл. 15.06.1987, опубл. 07.07.1989. Бюл. № 25.– 2 с.
32. А.с. № 1786639 СССР, H03K3/53. Импульсный генератор напряжения / С.Г. Конесев, В.И. Мельников, И.Г. Михайлов, Р.Т. Тукаев; заявитель УАИ им. Серго Орджоникидзе.– № 4936027/21; заявл. 12.05.1991, опубл. 07.01.1993. Бюл. № 1.– 3 с.
33. А.с. № 1639390 СССР, H02M5/06. Спиральный генератор импульсного напряжения / С.Г. Конесев, В.И. Мельников, И.Г. Михайлов; заявитель УАИ им. Серго Орджоникидзе.– № 2010149802; опубл. 1990. Бюл. № 3.– 2 с.
34. А.с. № 1644337 СССР, H02M7/523. Резонансный инвертор / С.Г. Конесев, В.И. Мельников, И.Г. Михайлов, А.Г. Чиглинцев; заявитель УАИ им. Серго Орджоникидзе.– № 4456897/07; заявл. 18.04.1988, опубл. 23.04.1991. Бюл. № 15.– 3 с.
35. А.с. № 1714791 СССР, H03K3/53. Устройство заряда формирующих линий / С.Г. Конесев, В.И. Мельников, И.Г. Михайлов, А.С. Никитин; заявитель УАИ им. Серго Орджоникидзе.– № 4687239/21; заявл. 10.05.1989, опубл. 23.02.1992. Бюл. № 7.– 2 с.
36. Бутырин, П.А., Гусев, Г.Г., Михеев, Д.В., Сиренко, В.В., Шакирзянов, Ф.Н. Разработка математической модели и анализ особенностей режимов индуктивно-емкостного преобразователя на основе каткона // Вестник Московского энергетического института, 2018.– № 4.– С. 81-88.
37. Бутырин, П.А., Гусев, Г.Г., Кужман, В.В., Михеев, Д.В., Шакирзянов, Ф.Н. Математическая модель фильтрокомпенсирующих устройств на основе гармонической линеаризации характеристики магнитопровода каткона // Вестник Московского энергетического института, 2015.– № 5.– С. 79-84.
38. Бутырин, П.А., Гусев, Г.Г., Кужман, В.В. Математическая модель фильтрокомпенсирующего устройства на основе катушки-конденсатора // Известия Российской академии наук. Энергетика, 2014.– № 2.– С. 130-135.

39. Бутырин, П.А., Гусев, Г.Г., Михеев, Д.В., Шакирзянов, Ф.Н. Идентификация математической модели фильтрокомпенсирующего устройства на основе каткона с учетом нелинейной характеристики магнитопровода // Электричество, 2017.– № 10.– С. 55-60.
40. Бутырин, П.А., Гусев, Г.Г., Михеев, Д.В., Шакирзянов, Ф.Н. Алгоритм определения параметров каткона – элемента оптимизации режимов электрических сетей // Известия Российской академии наук. Энергетика, 2015.– № 2.– С. 69-75.
41. Бутырин, П.А., Гусев, Г.Г., Михеев, Д.В., Шакирзянов, Ф.Н. Физическое моделирование поличастотного фильтрокомпенсирующего устройства на основе каткона // Известия Российской академии наук. Энергетика, 2017.– № 5.– С. 67-74.
42. Бутырин, П.А., Гусев, Г.Г., Кужман, В.В., Михеев, Д.В. Математическое и физическое моделирование фильтрокомпенсирующего устройства на основе каткона // Электричество, 2014.– № 11.– С. 58-62.
43. Конесев, С.Г., Алексеев, В.Ю. Многофункциональные интегрированные электромагнитные компоненты в системах преобразования электрической энергии. Обзор // Электротехнологии, электропривод и электрооборудование предприятий: межвуз. сб. науч. ст.– Уфа: изд-во УГНТУ, 2005.– С. 25-44.
44. Конесев, С.Г., Хазиева, Р.Т. Многофункциональные интегрированные электромагнитные компоненты и электротехнические устройства на их основе // Сб. 63-й науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых УГНТУ.– Уфа: изд-во УГНТУ, 2012.– С. 327-328.
45. Волков, И.В., Закревский, С.И. Преобразователь с распределенными параметрами для стабилизации тока в переменной нагрузке // Проблемы преобразовательной техники: тез. док. Всесоюз. науч.-техн. конф.– Киев, 1983.
46. А.с. № 849392 СССР, H02M5/06, G05F3/06. Индуктивно-емкостной преобразователь / Ю.А. Кашин; заявитель УАИ им. Серго Орджоникидзе.– № 2826809/24-07; заявл. 12.10.1979; опубл. 23.07.1981.– Б.И. N 27.– 3 с.

47. Пат. № 2407136 Российская Федерация, H02M5/06. Индуктивно-емкостной преобразователь / С.Г. Конесев, П.А. Хлюпин; заявитель Конесев Сергей Геннадьевич.— № 2008141538/09; заявл. 20.10.2008; опубл. 27.04.2010.— Б.И. N 35.— 6 с.
48. Бочкарева, Т.А. Индуктивно-емкостный преобразователь на основе многофункционального интегрированного электромагнитного компонента // Актуальные проблемы науки и техники — 2016: сб. ст., докл. и выступл. IX Междунар. науч.-практ. конф. мол. уч.— Уфа, УГНТУ: изд-во Нефтегазовое дело, 2016.— т.1.— С. 318-321.
49. Пат. № 2450413 Российская Федерация, H02M5/06. Индуктивно-емкостный преобразователь / С.Г. Конесев, Р.Т. Хазиева, И.С. Конесев, Р.А. Нурлыгаянов; заявитель Конесев Сергей Геннадьевич.— № 2010149802; заявл. 03.12.2010, опубл. 10.05.2012. Б.И. №13.— 7 с.
50. Хазиева, Р.Т. Электротехнические устройства на основе гибридных электромагнитных элементов в нефтяной промышленности // Актуальные проблемы науки и техники: сб. VIII Междунар. науч.-практ. конф. мол. уч.— в 3 т.— Уфа: изд-во УГНТУ, 2015.— т. 2.— С. 11 – 13.
51. Чернова, К.В. Развитие и перспективы применения магнитного воздействия на скважинную продукцию в нефтедобыче / К.В. Чернова: монография.— Уфа, 2005.— С. 88-93.
52. Хазиева, Р.Т. Индуктивно-емкостные преобразователи на основе многофункциональных интегрированных электромагнитных компонентов // Тинчуринские чтения: сб. 6-й междунар. науч. мол. конф. КГЭУ.— Казань, 2011.— С. 107-108.
53. Конесев, С.Г., Хазиева, Р.Т. Тенденции развития индуктивно-емкостных преобразователей, их основные параметры и характеристики // Актуальные вопросы энергетики: сб. науч. тр. Междунар. науч.-практ. конф.— Омск: изд-во ОмГТУ, 2017.— С. 252-255.

54. Konesev, S.G., Khazieva, R.T., Kirillov, R.V. The research of stabilization properties of inductive-capacitive converters based on the two-sections hybrid electromagnetic elements // Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics): collection of X International IEEE Scientific and Technical Conference, in IEEE Xplore Digital Library.– Omsk: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2016.– pp. 1–7.– [Электронный ресурс].– Doi: 10.1109/Dynamics.2016.7819030 (дата обращения: 03.09.2018).
55. Конесев, С.Г., Хазиева, Р.Т. Анализ стабилизационных свойств индуктивно-емкостных преобразователей при различных способах подключения гибридного электромагнитного элемента // Электротехнические системы и комплексы, 2017.– № 1(34).– С. 49-55.
56. Конесев, С.Г., Хазиева, Р.Т. Анализ динамики патентования индуктивно-емкостных преобразователей для систем стабилизации тока // Электротехнические и информационные комплексы и системы, 2016.– т. 12.– № 4.– С. 55-61.
57. Konesev, S.G., Khazieva, R.T., Konev, A.A., Kondratyev, E.Y. The research of heating efficiency of different induction heating systems // MATEC Web of Conferences: 12th International Scientific-Technical Conference on Electromechanics and Robotics “Zavalishin’s Readings” – 2017.– St. Petersburg, April 18-22, 2017.– Volume 113, 2017.– Article Number 01002.– Number of page(s) 4.– [Электронный ресурс].– Doi: <https://doi.org/10.1051/matecconf/201711301002> (дата обращения: 03.09.2018).
58. Конесев, С.Г., Кириллов, Р.В., Хазиева, Р.Т. Анализ энергетических и частотных характеристик многофункциональных интегрированных электромагнитных компонентов // Энергетические и электротехнические системы: сб. науч. тр.– Магнитогорск, 2014.– С. 65-75.
59. Konesev, S.G., Khazieva, R.T., Kirillov, R.V., Konev, A.A. Research on stabilization properties of inductive-capacitive transducers based on hybrid electromagnetic elements // Journal of Physics: Conference Series, 2017.– vol. 803.–

- № 1.– [Электронный ресурс]; Doi: 10.1088/1742-6596/803/1/012076.– URL: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/803/1/012076/pdf> (дата обращения: 02.03.2017).
60. Конесев, С.Г., Хазиева, Р.Т., Кириллов, Р.В. Исследование частотных характеристик двухсекционных многофункциональных интегрированных электромагнитных компонентов // Вестник УГАТУ, 2015.– т. 19.– № 4 (70).– С. 66-71.
61. Конесев, С.Г., Хазиева, Р.Т. Стабилизационные свойства индуктивно-емкостных преобразователей на основе гибридных электромагнитных элементов // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт, 2017.– № 5-6 (157).– С. 28-36.
62. Конесев, С.Г., Хазиева, Р.Т. Анализ основных характеристик, показателей и параметров индуктивно-емкостных преобразователей // Электропривод, электротехнологии и электрооборудование предприятий: сб. науч. тр. III Междунар. науч.-техн. конф.– Уфа: изд-во УГНТУ, 2017.– т. 1.– С. 457-462.
63. Хазиева, Р.Т. Анализ патентных исследований в области гибридных электромагнитных элементов // Научное творчество XXI века: сб. тр. VII Междунар. науч.-практ. конф. студ., асп. и мол. уч., 2013.– С. 354-361.
64. Буль, О.Б. Методы расчета магнитных систем электрических аппаратов: магнитные цепи, поля и программа FEMM: учеб. пособ. для студ. высш. учеб. заведений.– М.: изд. центр «Академия», 2005.– 336 с.
65. Конесев, С.Г., Хазиева, Р.Т. Оценка показателей надежности многофункциональных интегрированных электромагнитных компонентов [Электронный ресурс] // Современные проблемы науки и образования. Электронный научный журнал.– №1.– URL: <http://www.science-education.ru/121-18445> (дата обращения: 03.09.2018).
66. Конесев, С.Г., Хазиева, Р.Т. Методика оценки надежности сложных электромагнитных элементов [Электронный ресурс] // Современные проблемы

- науки и образования. Электронный научный журнал, 2015.– №1.– URL: www.science-education.ru/121-17925 (дата обращения: 03.09.2018).
67. Пат. № 108856 Российская Федерация, G01R31/06. Компактное устройство для испытания изоляции повышенным напряжением / С.Г. Конесев, Р.Т. Хазиева, Д.А. Стрижев; заявитель Конесев Сергей Геннадьевич.– № 2011113264/28; заявл. 06.04.2011; опубл. 27.09.2011. Б.И. N 27.– 2 с.
68. Максвелл, Дж. К. Избранные сочинения по теории электромагнитного поля.– М.: ГИТТЛ, 1952.
69. Конесев, С.Г., Хазиева, Р.Т., Кириллов, Р.В. Методы анализа электродинамических процессов в гибридных электромагнитных элементах [Электронный ресурс] // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. Электронный научный журнал, 2015.– №8.– Ч. 5.– С. 864-868.– URL: www.rae.ru/upfs/?section=content&op=show_article&article_id=7260 (дата обращения: 03.09.2018).
70. Матвеевский, В.Р. Надежность технических систем: учеб. пособие.– М.: изд-во МГИЭМ, 2002.– 113 с.
71. Половко, А.М., Гуров, С.В. Основы теории надежности.– 2-е изд., перераб. и доп.– СПб.: изд-во БХВ-Петербург, 2008.– С. 73-97.
72. Хазиева, Р.Т., Кириллов, Р.В. Оценка надежности многофункциональных интегрированных электромагнитных компонентов // Сб. 66-й науч.-техн. конф. студ., асп. и мол. уч. УГНТУ.– Уфа: изд-во УГНТУ, 2015.– Кн. 1.– С. 327.
73. Конесев, С.Г., Хазиева, Р.Т. Разработка схем замещения базовых структур многофункциональных интегрированных электромагнитных компонентов // Сб. 64-й науч.-техн. конф. студ., асп. и мол. уч. УГНТУ.– Уфа: изд-во УГНТУ, 2013.– Кн. 1.– С. 384.
74. Конесев, С.Г., Хазиева, Р.Т. Многофункциональные интегрированные электромагнитные компоненты и электротехнические устройства на их основе // Сб. 65-й науч.-техн. конф. студ., асп. и мол. уч. УГНТУ.– Уфа: изд-во УГНТУ, 2014.– Кн. 2.– С. 249.

75. Пат. № 2412521 Российская Федерация, H02M5/06. Трехфазный индуктивно-емкостной преобразователь / С.Г. Конесев, П.А. Хлюпин, И.С. Конесев; заявитель Конесев Сергей Геннадьевич.— № 2010100700/07; заявл. 11.01.2010; опубл. 20.02.2011.— Б.И. N 5.— 8 с.
76. А.с. № 834843 СССР, H03K3/353. Устройство для заряда емкостного накопителя энергии / А.Г. Бомко, В.С. Иванов, В.Н. Красавин, Д.И. Панфилов, О.А. Романенко, В.Н. Сирик; заявитель Московский институт электронной техники.— № 2733408/18-21; заявл. 02.03.1979; опубл. 30.05.1981.— Б.И. N 20.— 4 с.
77. А.с. № 1780150 СССР, H03K3/353. Устройство для заряда емкостного накопителя энергии / А.В. Никитин, В.И. Шарабыров; заявитель УАИ им. Серго Орджоникидзе.— № 4749246/21; заявл. 11.10.1989; опубл. 07.12.1992.— Б.И. N 45.— 6 с.
78. Малькявичюс, Р.С. Статический преобразователь для заряда конденсаторной батареи и его влияние на питающую сеть // Электромагнитное совмещение силовых полупроводниковых преобразователей.— Таллин, 1981.— С. 85–88.
79. А.с. № 552681 СССР, H03K3/353. Устройство для заряда емкостного накопителя энергии от сети переменного тока / В.С. Иванов, В.Н. Красавин, В.С. Подволоцкий, Б.В. Шипилов; заявитель Предприятие П/Я А-3695.— № 2137876/21; заявл. 26.05.1975; опубл. 30.03.1977.— Б.И. N 12.— 2 с.
80. Пат. № 2021643 Российская Федерация, H03K3/53. Система для питания импульсной нагрузки / В.В. Додотченко, А.Г. Николаев; заявитель Додотченко Владислав Владимирович, Николаев Анатолий Григорьевич.— № 5042534/21; заявл. 17.04.1992; опубл. 15.10.1994.— Б.И. N 14.— 9 с.
81. Вашкевич, Е., Таназлы, Г., Болотовский, Ю., Никитин, А. Разработка систем заряда емкостных накопителей энергии // Силовая электроника, 2008.— № 4.— С. 49-56.— [Электронный ресурс].— URL: http://www.power-e.ru/2008_4_49.php (дата обращения: 03.09.2018).

82. Пат. № 117748 Российская Федерация, H02M7/162. Устройство заряда емкостного накопителя / С.Г. Конесев, Р.Т. Хазиева, Р.В. Кириллов, А.В. Мухаметшин, М.Р. Садиков; заявитель Конесев Сергей Геннадьевич.— № 2012105359/07; заявл. 15.02.2012; опубл. 27.06.2012. Б.И. N 18.— 2 с.
83. Конесев, С.Г., Хазиева, Р.Т. Математическая модель односекционного многофункционального интегрированного компонента [Электронный ресурс].— URL: <http://econf.rae.ru/article/7908> (дата обращения: 10.10.2014).
84. Пат. № 2477918 Российская Федерация, H03K3/53, H03B1/02. Генератор импульсов напряжений / С.Г. Конесев, Р.Т. Хазиева, Р.В. Кириллов, А.В. Мухаметшин, М.Р. Садиков; заявитель Конесев Сергей Геннадьевич.— № 2012107734/08; заявл. 29.02.2012; опубл. 20.03.2013. Б.И. N 18.— 6 с.
85. Конесев, С.Г., Хазиева, Р.Т., Хлюпин, П.А., Кондратьев, Э.Ю. Анализ динамики патентования методов и устройств регулирования реологических свойств высоковязкой нефти на основе энергосберегающих индукционных технологий // Нефтегазовое дело: электр. науч. журн., 2013.— №.5.— С. 179-189.— URL: http://www.ogbus.ru/authors/KonesevSG/KonesevSG_1.pdf (дата обращения: 03.09.2018).
86. Кондратьев Э.Ю. Электротермическая система обеспечения тепловых режимов оборудования нефтяных месторождений // Диссертация на соискание уч. степ. канд. техн. наук.— Уфа, 2018.— 183 с.
87. Конесев, С.Г., Садиков, М.Р., Хлюпин, П.А. Анализ эффективности применения нагревательных систем при перекачке вязких нефтей // Электропривод, электротехнологии и электрооборудование предприятий: сб. науч. тр. III-й Всерос. науч.-техн. конф.— Уфа: изд-во УГНТУ, 2011.— С. 212-218.
88. Конесев, С.Г., Хазиева, Р.Т., Кириллов, Р.В., Кондратьев, Э.Ю., Садиков, М.Р., Хлюпин, П.А. Индукционные нагревательные системы для протяженных нефтепроводов // Нефтегазовое дело, 2014.— Т.12.— №4.— С. 40-47.

89. Пат. № 2584137 Российская Федерация, H05B6/10. Способ электротермического воздействия на протяженные трубопроводы и индукционная нагревательная система для его реализации / С.Г. Конесев, Р.Т. Хазиева, Р.В. Кириллов, Э.Ю. Кондратьев, М.Р. Садиков; заявитель ООО «Газпром добыча Ямбург».— № 2014127219/07; заявл. 03.07.2014; опубл. 20.05.2016. Б.И. N 14.— 11 с.
90. Пат. № 164415 Российская Федерация, МПК F16L9/00. Труба для транспортировки вязких текучих сред / С.Г. Конесев, Р.Т. Хазиева, Р.В. Кириллов, Э.Ю. Кондратьев; заявитель ООО «Газпром добыча Ямбург».— № 2014124302/06; заявл. 6.06.2014; опубл. 27.08.2016. Б.И. N 24.— 2 с.
91. Конесев, С.Г., Хазиева, Р.Т., Конев, А.А., Кондратьев, Э.Ю. Исследование эффективности работы индукторов // ЗАВАЛИШИНСКИЕ ЧТЕНИЯ – 2017: сб. тр XI Междунар. науч.-техн. конф.— Санкт-Петербург: изд-во СПбГУАП, 2017.— С. 181-185.
92. Конесев, С.Г., Хазиева, Р.Т. Электромагнитная совместимость устройств заряда емкостного накопителя с гибридными компонентами // XIV Королёвские чтения: сб. тр. Междунар. мол. науч. конф.— Самара: изд-во Самарский ун-т, 2017.— Т.1.— С. 539.
93. Конесев, С.Г., Хазиева, Р.Т., Кириллов, Р.В., Гайнутдинов, Э.З., Кондратьев, Э.Ю. Электромагнитная совместимость устройств на гибридных электромагнитных компонентах // Динамика механизмов, машин и систем, 2017.—Т. 5.— №. 3.— С. 44-52.— [Электронный ресурс].— DOI: 10.25206/2310-9793-2017-5-3-44-52 (дата обращения: 03.09.2018).
94. Хазиева, Р.Т., Бочкарева, Т.А. Анализ электромагнитной совместимости индуктивно-емкостного преобразователя с системой электроснабжения // Энергетические системы: сб. тр. II Междунар. науч.-техн. конф.— Белгород: изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова, 2017.— С. 225-228.
95. Konesev S.G., Khazieva R.T., Kirillov R.V., Gainutdinov, I.Z., Kondratyev, E.Y. Electromagnetic compatibility of devices on hybrid electromagnetic components //

- Journal of Physics: Conference Series, 2017.— Volume 944, conference 1.— Number 012058.— [Электронный ресурс].— Doi: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/944/1/012058> (дата обращения: 03.09.2018).
96. Конесев, С.Г., Хазиева, Р.Т. Анализ режимов стабилизации индуктивно-емкостного преобразователя на основе гибридного электромагнитного элемента // Повышение надежности и энергоэффективности электротехнических систем и комплексов: межвуз. сб. науч. тр. с междунар. уч.— Уфа: изд-во УГНТУ, 2016.— С. 461-467.
97. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2017611392 Российская Федерация. Расчет коэффициента стабилизации тока нагрузки индуктивно-емкостного преобразователя по частотным характеристикам многофункционального интегрированного электромагнитного компонента / С.Г. Конесев, Р.Т. Хазиева; заявитель ООО НИЦ Энергодиагностика.— № 2016661969; заявл. 07.11.2017, опубл. 02.02.2017.
98. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2017619387 Российская Федерация. Расчет параметров устройства заряда емкостного накопителя на базе индуктивно-емкостного преобразователя / С.Г. Конесев, Р.Т. Хазиева; заявитель ООО НИЦ Энергодиагностика.— № 2017616225; заявл. 27.06.2017, опубл. 24.08.2017.
99. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2017614066 Российская Федерация. Расчет показателей надежности двухсекционных многофункциональных интегрированных электромагнитных компонентов / С.Г. Конесев, Р.Т. Хазиева; заявитель ООО НИЦ Энергодиагностика.— № 2017611073; заявл. 10.02.2017, опубл. 06.04.2017.
100. Хазиева, Р.Т. Математическая модель индуктивно-емкостного преобразователя для системы стабилизации тока // Нефть и газ — 2016: сб. тез. 70-й Междунар. мол. науч. конф.— Москва: изд-во РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2016.— т. 2.— С. 393.

101. Месяц, Г.А. Импульсная энергетика и электроника.— М.: изд-во Наука, 2004.— 704 с.
102. Пат. № 194352 Российская Федерация. Импульсный стабилизатор тока / В.И. Лачин, В.Р. Проус, Н.Д. Зиновьев; заявитель Конесев Сергей Геннадьевич.— № 2012105359/07; заявл. 15.02.2012; опубл. 10.12.2002. Б.И. N 15.— 2 с.
103. Пат. № 123266 Российская Федерация, H02M3/155. Зарядное устройство / В.М. Опре, П.А. Кошелев, С.В. Парамонов, С.А. Дозоров, А.А. Тимахович; заявитель СПбГЭТУ ЛЭТИ.— № 2012128058/07; заявл. 03.07.2012; опубл. 20.12.2012. Б.И. N 35.— 2 с.
104. Konesev S.G., Khazieva R.T., Bochkareva T.A. Mathematical modeling of inverter with a hybrid resonant circuit operation modes // IVrd International Conference on Industrial Engineering 2018 (ICIE-2018).— Saint Petersburg, 2018.— pp. 1-5.
105. Пат. № 2632412 Российская Федерация, H03K3/53, H02M5/06. Индуктивно-емкостный преобразователь / С.Г. Конесев, Р.Т. Хазиева, Т.А. Бочкарева; заявитель Конесев Сергей Геннадьевич.— № 2016143651; заявл. 07.11.2016, опубл. 04.10.2017. Б.И. №28.— 12 с.
106. Konesev S.G., Khazieva R.T., Kirillov R.V. Research of the frequency characteristics of hybrid inductive-capacitive converters // IOP: Earth and Environmental Science (EES) .— Saint Petersburg, 2018.— pp. 1-5.
107. Хазиева, Р.Т., Кириллов, Р.В., Колесникова, О.И. Modeling of capacitive storage charge device based on multifunction integrated electromagnetic component // Нефть и газ – 2015: сб. тр. 69-й Междунар. мол. науч. конф.— Москва: изд-во РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2015.— С. 388-393.
108. Конесев, С.Г., Хазиева, Р.Т. Моделирование устройства заряда емкостного накопителя электрогидравлического генератора // Инновационные направления развития электроприводов, электротехнологий и электрооборудования: межвуз. сб. науч. тр. с междунар. уч.— Уфа: изд-во УГНТУ, 2012.— С. 184-188.

109. Robert, S. B., Philip, T. K. IEEE Transactions on Power Electronics 28, 2013.– P. 537-546.
110. Хазиева, Р.Т., Бочкарева, Т.А. Исследование разрядной цепи электрогидроимпульсной очистительной системы // Энергия молодежи для нефтегазовой индустрии: сб. Междунар. науч.-практ. конф. мол. уч.– Альметьевск: изд-во АГНИ, 2017.– С. 74-80.
111. Хазиева, Р.Т., Бочкарева, Т.А. Математическое моделирование электрогидроимпульсной очистительной системы // Информационные технологии в моделировании и управлении: подходы, методы, решения: сб. мат. I Всерос. науч. конф.– Тольятти: изд-во ТолГУ, 2017.– Т. 1.– С. 320-328.
112. Хазиева, Р.Т., Бочкарева, Т.А. Исследование циклического перезаряда электрогидроимпульсной очистительной системы // Энергетические и электротехнические системы: межвуз. сб. науч. тр.– Магнитогорск: изд-во МГТУ им. Г.И. Носова, 2017.– Вып. 4.– С. 258-263.
113. Хазиева, Р.Т., Кириллов, Р.В., Путинцева, А.А. Моделирование системы заряда емкостного накопителя // Электропривод, электротехнологии и электрооборудование предприятий: сб. науч. тр. II Междунар. науч.-техн. конф.– Уфа: изд-во УГНТУ, 2015.– С. 170-177.
114. Хазиева, Р.Т., Кириллов, Р.В., Колесникова, О.И. Modeling of system charge of storage capacitor based on multifunction integrated electromagnetic component // Нефть и газ – 2015: сб. тез. 69-й Междунар. мол. науч. конф. Москва: изд-во РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2015.– Т. 3.– С. 378.
115. Конесев, С.Г., Хазиева, Р.Т., Хлюпин, П.А., Кондратьев, Э.Ю. Анализ динамики патентования методов и устройств регулирования реологических свойств высоковязкой нефти // Нефтегазовое дело. Электронный научный журнал, 2013.– №5.– С. 179-189.– [Электронный ресурс].– URL: http://www.ogbus.ru/authors/KonesevSG/KonesevSG_1.pdf (дата обращения: 03.09.2018).

116. Конесев, С.Г., Хазиева, Р.Т., Кириллов, Р.В., Кондратьев, Э.Ю., Садиков, М.Р., Хлюпин, П.А. Индукционные нагревательные системы для протяженных нефтепроводов // Нефтегазовое дело.— Уфа: изд-во УГНТУ, 2014.— т.12.— №4.— С. 40-47.
117. Пат. № 164415 Российская Федерация, F16L9/00. Труба для транспортировки вязких текучих сред / С.Г. Конесев, Р.Т. Хазиева, Р.В. Кириллов, Э.Ю. Кондратьев; заявитель ООО Газпром добыча Ямбург.— № 2014124302/06.; заявл. 16.06.2014; опубл. 27.08.2016. Б.И. N 24.— 2 с.
118. Пат. № 2299794 Российская Федерация, B23K 9/09, B23K 9/06. Однофазный сварочный стабилизатор тока / В.Т. Тарасов; заявитель Тарасов Валерий Тимофеевич.— № 2005131715/02; заявл. 13.10.2005; опубл. 27.05.2007. Б.И. N 15.— 14 с.
119. Пат. № 77517 Российская Федерация, H02M5/06. Индуктивно-емкостный преобразователь / И.В. Саенко, В.М. Опре, А.А. Новик, П.А. Кошелев, С.В. Парамонов, С.А. Дозоров; заявитель СПбГЭТУ ЛЭТИ.— № 2008118172/22; заявл. 06.05.2008; опубл. 20.10.2008. Б.И. N 29.— 1 с.
120. Пат. № 100687 Российская Федерация, H02M3/155. Источник неизменного тока / С.А. Дозоров, П.А. Кошелев, В.М. Опре, С.В. Парамонов, В.Н. Терещенко; заявитель СПбГЭТУ ЛЭТИ.— № 2010126898/07; заявл. 30.06.2010; опубл. 20.12.2010. Б.И. N 35.— 1 с.
121. Волков, И.В., Пентегов, И.В. Оптимальные процессы заряда емкостных накопителей // Известия вузов. Энергетика, 1967.— №4.
122. Пентегов, И.В., Волков, И.В. Об оптимальном законе заряда батарей конденсаторов.— ДАН УССР, 1996.— №4.
123. Mostov, P.M., Newringer, J.L., Rigney, D.S. Optimum Capacitor Changing Efficiency for Space Systems.— Proceedings of the IRE, 1961.— №5.
124. Пат. № 114567 Российская Федерация, H02M5/06. Высоковольтный источник неизменного тока / А.А. Дозоров, С.А. Дозоров, В.М. Опре, А.И. Сомов,

- В.Н. Терещенко; заявитель ООО Газпром трансгаз Санкт-Петербург.– № 2011113770/07; заявл. 08.04.2011; опубл. 27.03.2012. Б.И. N 9.– 1 с.
125. Дозоров, С.А., Опре, В.М. Электромагнитные процессы в трехфазных индуктивно-емкостных преобразователях // Силовая электроника, 2014.– №46.– С. 61-64.
126. Конесев, С.Г., Хазиева, Р.Т., Бочкарева, Т.А. Математическая модель устройства заряда емкостного накопителя на базе индуктивно-емкостного преобразователя // Электропривод, электротехнологии и электрооборудование предприятий: сб. науч. тр. III Междунар. науч.-техн. конф.– Уфа: изд-во УГНТУ, 2017.– т. 1.– С. 381-387.
127. Хазиева, Р.Т., Бочкарева, Т.А. Моделирование устройства заряда емкостного накопителя на базе индуктивно-емкостного преобразователя // Актуальные проблемы науки и техники: сб. X Междунар. науч.-практ. конф.– Уфа: изд-во УГНТУ, 2017.– т. 1.– С. 276-278.
128. Хазиева, Р.Т. Управление индуктивно-емкостным преобразователем с помощью SCADA-системы ZETVIEW // Актуальные проблемы науки и техники: сб. X Междунар. науч.-практ. конф.– Уфа: изд-во УГНТУ, 2017.– т. 1.– С. 272-275.
129. Вашкевич, Е., Таназлы, Г., Болотовский, Ю., Никитин, А. Разработка систем заряда емкостных накопителей энергии. Часть 2 // Силовая электроника. Электронный архив, 2009.– №1.– С. 34-45.– [Электронный ресурс].– URL: http://www.power-e.ru/2009_1_34.php (дата обращения: 03.09.2018).
130. Konesev, S.G., Khazieva, R.T., Kirillov, R.V. Multifunctional integrated electromagnetic components work modes in push-pull converters // Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM).– St. Petersburg: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2017.– pp. 1-5.– [Электронный ресурс].– Doi: 10.1109/ICIEAM.2017.8076321 (дата обращения: 03.09.2018).
131. Конесев, С.Г., Хазиева, Р.Т., Кириллов, Р.В. Оценка показателей надежности генератора импульсов напряжения // Электропривод,

- электротехнологии и электрооборудование предприятий: сб. науч. тр. II Междунар. науч.-техн. конф.– Уфа: изд-во УГНТУ, 2015.– С. 144-150.
132. Конесев, С.Г., Хазиева, Р.Т. Методы оценки показателей надежности сложных компонентов и систем [Электронный ресурс] // Современные проблемы науки и образования. Электронный научный журнал, 2015.– №1.– URL: <http://www.science-education.ru/121-17558> (дата обращения: 03.09.2018).
133. Хазиева, Р.Т. Исследование работы гибридного электромагнитного элемента в двухтактном преобразователе // Наука. Технология. Производство – 2017: сб. матер. Междунар. науч.-техн. конф. студ., асп. и мол. уч.– Филиал УГНТУ в г. Салавате, 2017.– С. 278-280.
134. Хазиева, Р.Т. Математическая модель многофункционального интегрированного электромагнитного компонента в двухтактном преобразователе // Нефть и газ – 2017: сб. тез. 71-й Междунар. мол. науч. конф.– Москва: изд-во РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина., 2017.– т. 3.– С. 125.
135. Медведев, В.А. Расчет автономных резонансных инверторов для индукционного нагрева: учеб.-метод. пособие.– Тольятти: ТолГУ, 2010.– 47 с.
136. Зиновьев, Г.С. Силовая электроника: учеб. пособие для бакалавров.– 5-е изд., испр. и доп.– М: изд-во Юрайт, 2012.– 667 с.
137. Попков, О.З. Основы преобразовательной техники: учеб. пособие для вузов.– 2-е изд., стереот.– М: изд. дом МЭИ, 2007.– 200 с.
138. Сбродов, А. Выбор силовых транзисторов для преобразователей напряжения с резонансным контуром // Электронные компоненты, 2002.– № 6.– 3 с.
139. Научно-практическое пособие по электронике / Силовой трансформатор. Расчет силового трансформатора.– [Электронный ресурс].– URL: <http://www.meanders.ru/silovoytransformator.shtml> (дата обращения: 03.09.2018).
140. Конесев, С.Г., Хазиева, Р.Т. Методика расчета индуктивно-емкостных преобразователей на основе многофункциональных интегрированных электромагнитных компонентов // Вестник УГАТУ, 2018.– Т. 22.– №1 (79).–

- С. 97-105.– URL: [http:// journal.ugatu.ac.ru/index.php/Vestnik/article/view/226](http://journal.ugatu.ac.ru/index.php/Vestnik/article/view/226)
(дата обращения: 03.09.2018).
141. Брылина, О.Г., Гельман, М.В. Исследование двухзвенных преобразователей частоты // Электротехнические системы и комплексы, 2013.– № 21.– С. 270-278.
142. Храмшин, Т.Р., Корнилов Г.П., Крубцов Д.С. Формирование фазных напряжений четырехуровневого высоковольтного преобразователя частоты // Электротехнические системы и комплексы, 2011.– № 1.– С. 174-181.
143. Konesev S.G., Khazieva R.T., Kirillov R.V. Inductive-capacitive converters for high-voltage secondary power supplies // Journal of Physics: Conference Series, 2018.
144. Конесев, С.Г., Хазиева, Р.Т. Оценка стабилизационных свойств индуктивно-емкостных преобразователей // Электротехнические и информационные комплексы и системы, 2018.– № 2.

Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2017611392

Расчет коэффициента стабилизации тока нагрузки
индуктивно-емкостного преобразователя по частотным
характеристикам многофункционального интегрированного
электромагнитного компонента

Правообладатель: *Общество с ограниченной ответственностью
Научно-инженерный центр «Энергодиагностика» (RU)*

Авторы: *Конесев Сергей Геннадьевич (RU),
Хазиева Регина Тагировна (RU)*



Заявка № 2016661969

Дата поступления 07 ноября 2016 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 02 февраля 2017 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2017614066

**Расчет показателей надежности двухсекционных
многофункциональных интегрированных
электромагнитных компонентов**

Правообладатель: **Общество с ограниченной ответственностью
Научно-инженерный центр «Энергодиагностика» (RU)**

Авторы: **Конесев Сергей Геннадьевич (RU),
Хазиева Регина Тагировна (RU)**



Заявка № **2017611073**

Дата поступления **10 февраля 2017 г.**

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ **06 апреля 2017 г.**

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2017619387

Расчет параметров устройства заряда емкостного
накопителя на базе индуктивно-емкостного преобразователя

Правообладатель: *Общество с ограниченной ответственностью
Научно-инженерный центр «Энергодиагностика» (RU)*

Авторы: *Конесев Сергей Геннадьевич (RU), Хазиева Регина
Тагировна (RU), Бочкарева Татьяна Андреевна (RU)*

Заявка № 2017616225

Дата поступления 27 июня 2017 г.

Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ 24 августа 2017 г.

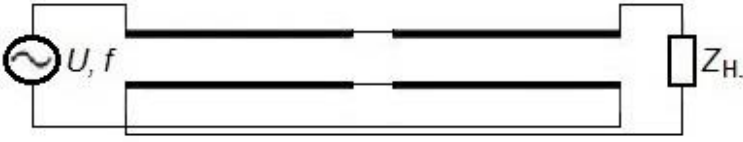
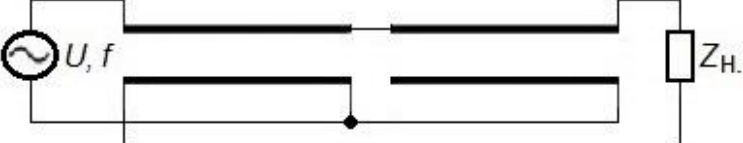
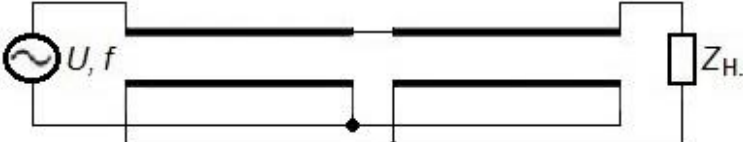
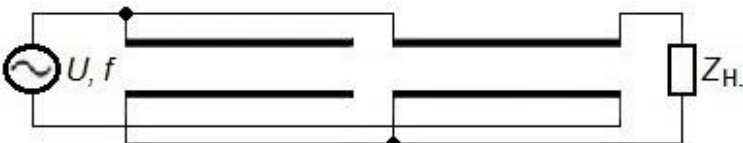
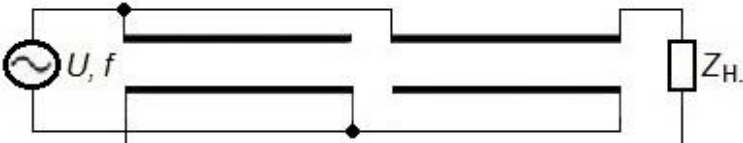


Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

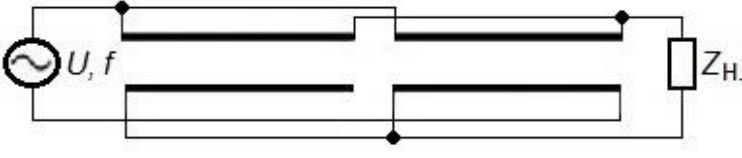
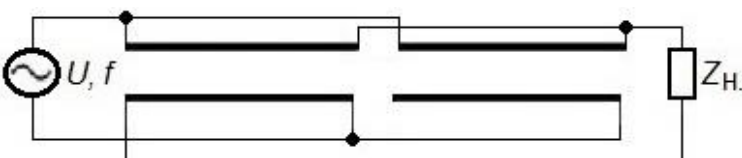
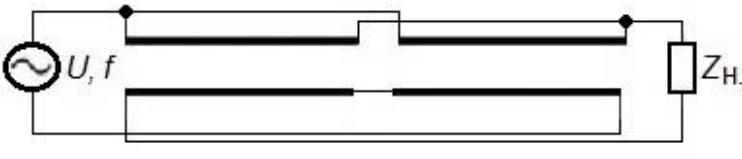
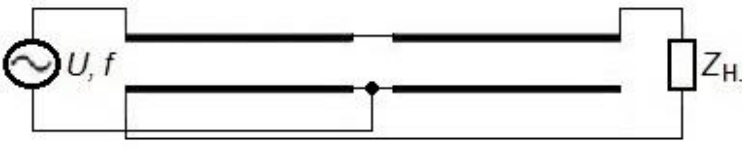
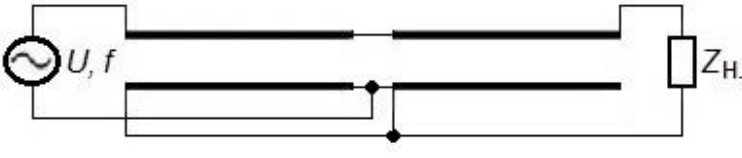
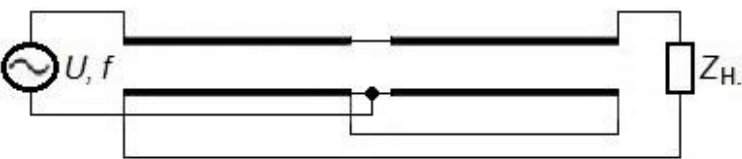
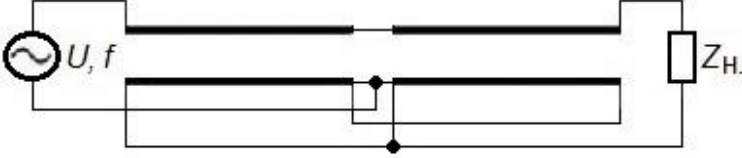
Г.П. Ислюев

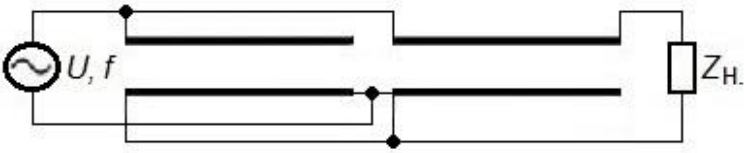
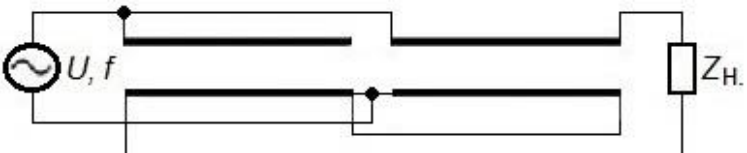
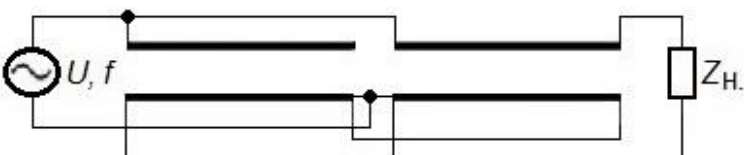
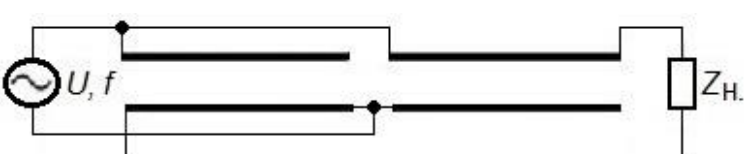
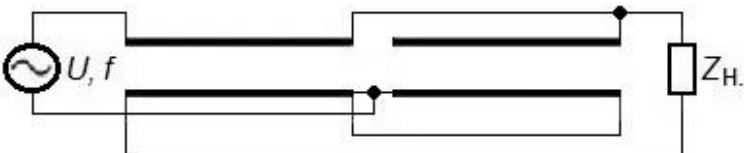
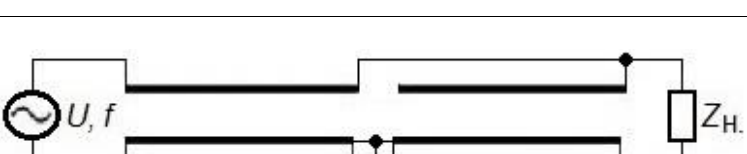
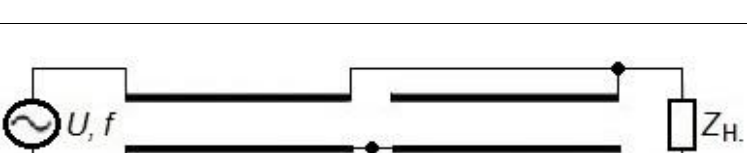
ПРИЛОЖЕНИЕ Б

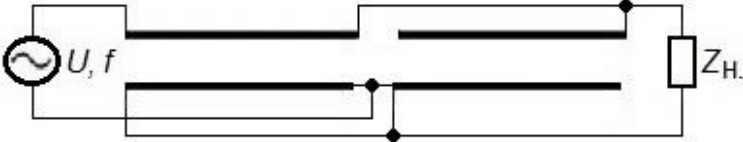
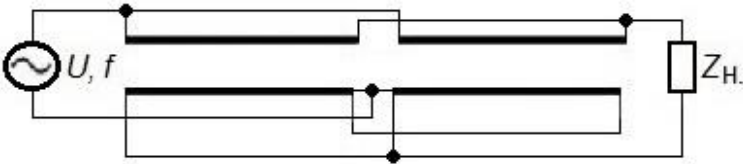
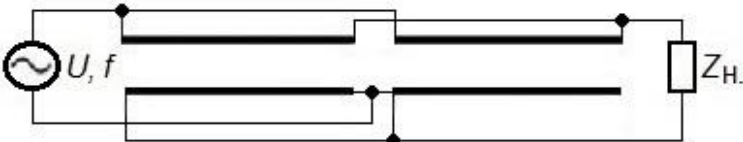
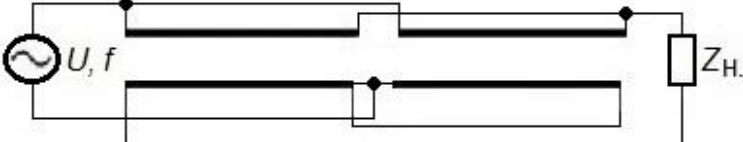
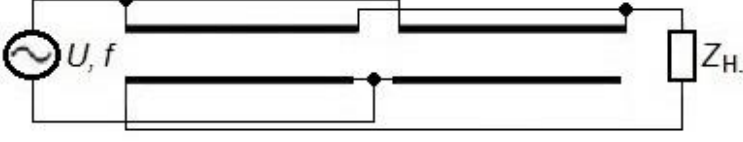
Схемы индуктивно-емкостных преобразователей с подключенной нагрузкой

№	Схемы	Области применения, параметры стабилизации и усиления
1		Измерительная техника (датчики, $k = 3,7 \%$, $k_u = 9$)
2		Электропривод (источники постоянного момента, $k = 2,6 \%$, $k_u = 31$)
3		Электропривод (ССТ для плавного пуска приводов двигателей, $k = 2,7 \%$, $k_u = 36$)
4		Электропривод (ССТ для питания группового электропривода, $k = 3 \%$, $k_u = 30$)
5		Электротермия (ССТ для электронно-лучевой сварки, $k = 4,4 \%$, $k_u = 21$)
6		Электротехнология (ССТ для питания гальванотехнических установок, $k = 4,9 \%$, $k_u = 40$)

7		Электротехнология (ССТ для питания установок размерной электрохимической обработки, $k = 4,7 \%$, $k_u = 35$)
8		Импульсная энергетика (ССТ для испытания изоляции повышенным напряжением ($k = 2 \%$, $k_u = 32$))
9		Электротермия (ССТ для воздушно-плазменной резки, $k = 4,6 \%$, $k_u = 34$)
10		Электротехнология (ССТ для питания электронно-ионных установок, $k = 5 \%$, $k_u = 33$)
11		Электротермия (ССТ для питания дуговых сталеплавильных печей, $k = 4,5 \%$, $k_u = 22$)
12		Электротехнология (ССТ для питания электролизеров, $k = 4,8 \%$, $k_u = 29$)
13		Электротермия (ССТ для электротермических систем, $k = 3,5 \%$, $k_u = 20$)

14		Электропривод (ССТ для частотно-токового регулирования АД, $k = 2,5 \%$, $k_u = 28$)
15		Электротермия (ССТ для питания плазматронов, $k = 2,8 \%$, $k_u = 19$)
16		Электротермия (ССТ для контактного нагрева, $k = 2,9 \%$, $k_u = 18$)
17		Преобразовательная техника (ССТ для заряда ЕН, $k = 1,9 \%$, $k_u = 13,5$)
18		Электропривод (ССТ для двухзонного регулирования скорости вращения двигателей постоянного тока, $k = 2,3 \%$, $k_u = 14$)
19		Электропривод (ССТ для наматывающе-разматывающих устройств, $k = 2,1 \%$, $k_u = 15$)
20		Электропривод (ССТ для производства проволоки, $k = 2,2 \%$, $k_u = 16$)

21		Электропривод (ССТ для производства металлической полосы, $k = 2,4 \%$, $k_u = 17$)
22		Электротермия (ССТ для питания плазмодвигателей, $k = 3,1 \%$, $k_u = 26$)
23		Электротермия (ССТ для плазмохимии, $k = 3,2 \%$, $k_u = 27$)
24		Электротермия (ССТ для МГД-генераторов, $k = 3,3 \%$, $k_u = 45$)
25		Электротермия (ССТ для питания установок электрошлакового переплава, $k = 3,4 \%$, $k_u = 25$)
26		Электротермия (ССТ для питания вакуумно-дуговых печей, $k = 3,6 \%$, $k_u = 23$)
27		Электротермия (ССТ для питания руднотермических печей, $k = 3,8 \%$, $k_u = 24$)

28		Квантовая электроника (импульсные оптические квантовые генераторы для заряда накопительных конденсаторов, $k = 4,1 \%$, $k_u = 10$)
29		Квантовая электроника (импульсные оптические квантовые генераторы для заряда накопительных конденсаторов, $k = 4 \%$, $k_u = 11$)
30		Квантовая электроника (непрерывные твердотельные оптические квантовые генераторы для питания ламп накачки, $k = 4,2 \%$, $k_u = 12$)
31		Квантовая электроника (непрерывные газовые оптические квантовые генераторы для питания ламп накачки, $k = 4,3 \%$, $k_u = 13$)
32		Импульсная энергетика (высоковольтные ССТ для генераторов мощных импульсов напряжения, $k = 3,9 \%$, $k_u = 75$)

Справки о внедрении

**Закрытое акционерное общество «Уфа-АвиаГаз»**

450030, Россия, Республика Башкортостан,
г. Уфа, Индустриальное шоссе, 119
ИНН 0273034055
КПП 025250001

Тел. (347) 239-22-87; факс: (347) 238-12-86
Газ. связь: (733) 92-4-58, 92-4-86, 92-4-71
E-mail: mail@ufa-aviagaz.ru
www.ufa-aviagaz.ru

СПРАВКА

о результатах внедрения научных исследований
в области оценки надежности электромагнитных элементов

Настоящим подтверждаю факт использования результатов научных исследований Хазиевой Р.Т. (методика расчета показателей надежности гибридных электромагнитных элементов (многофункциональных интегрированных электромагнитных компонентов) на предприятии ЗАО «Уфа-АвиаГаз» для оценки (расчета) показателей надежности различных электротехнических устройств на их основе (генераторов импульсов напряжения, индуктивно-емкостных преобразователей, устройств заряда емкостных накопителей, устройств для испытания изоляции повышенным напряжением) в производстве работ по разработке и проектированию новых испытательных установок и систем термического воздействия на объекты НГО.

**Зам. директора по энергетике
и техническому диагностированию**

18 марта 2015 года



Сердюк А.А.
Сердюк А.А.

Общество с ограниченной ответственностью

Научно-инженерный центр «Энергодиагностика»

450112, Россия, Республика Башкортостан,
г. Уфа, ул. Л.Толстого, 21, оф. 56
ИНН 0277100781, КПП 027701001

Тел.: +7 (347) 240-31-20,
Факс: +7 (347) 260-52-64
E-Mail: energodi@yandex.ru

СПРАВКА

о результатах внедрения технических решений,
получивших патентную защиту

Настоящим подтверждаю использование в производстве работ по разработке новых испытательных установок и систем термического воздействия на объекты НГО следующих технических решений, получивших патентную защиту:

1. **Компактное устройство для испытания изоляции повышенным напряжением.** Патент №108856 (РФ) от 27.09.2011, авторы: Конесев С.Г, Хазиева Р.Т. и др.

2. **Устройство заряда емкостного накопителя.** Патент №117748 (РФ) от 27.06.2012, авторы: Конесев С.Г, Хазиева Р.Т. и др.

3. **Генератор импульсов напряжения.** Патент №2477918 (РФ) от 20.03.2013, авторы: Конесев С.Г, Хазиева Р.Т. и др.

Директор ООО НИЦ «Энергодиагностика»

А.Е. Кузнецов

18 декабря 2017 года



УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе

ФГБОУ ВО УГНТУ

И.Р. Ибрагимов

« 4 » июля 2018 г.



АКТ

о внедрении в учебный процесс университета результатов диссертационной работы
аспиранта кафедры «Электротехника и электрооборудование предприятий»
ХАЗИЕВОЙ Регины Тагировны на тему: «Системы стабилизации тока на основе
индуктивно-емкостных преобразователей», представленной на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Мы, нижеподписавшиеся, декан факультета автоматизации
производственных процессов, доктор техн. наук, профессор кафедры
«Электротехника и электрооборудование предприятий» Павлова З.Х., заведующий
кафедрой «Электротехника и электрооборудование предприятий», канд. техн. наук,
доцент Шабанов В.А., канд. техн. наук, доцент кафедры «Электротехника и
электрооборудование предприятий» Хлюпин П.А. составили настоящий акт о том,
что материалы диссертационной работы Хазиевой Р.Т. внедрены в учебный процесс
по направлению 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» на кафедре
«Электротехника и электрооборудование предприятий» и используются при чтении
лекций и проведении практических занятий и лабораторных работ по дисциплинам
«Общая энергетика», «Электрические и электронные аппараты» и
«Электротехнологические установки и системы для нефтегазовой отрасли».

Декан ФАПП,

доктор техн. наук, профессор

Заведующий каф. ЭЭП,

канд. техн. наук, доцент

Доцент каф. ЭЭП

канд. техн. наук

З.Х. Павлова

В.А. Шабанов

П.А. Хлюпин